

# Evaluierung und Analyse von Objektivparametern

## hinsichtlich der Bewertung von Objektiven für laufzeitmessende PMD-Kamerasysteme

---

Bachelorarbeit

im Institut für Medien- und Phototechnik

an der Fachhochschule Köln

Autorin

Ilona Schwengber

Mat.-Nr. 11062052

Referent: Prof. Dr.-Ing. G. Fischer

Korreferent: Dr.-Ing. M. Albrecht, PMDTechnologies

Köln, Februar 2011

# Evaluation and analysis of lens parameters concerning the rating of lenses for time-of-flight PMD-Camerasystems

---

Bachelorarbeit

at the Institute of Media- and Imaging Technology

Cologne University for Applied Sciences

Author

Ilona Schwengber

Mat.-Nr. 11062052

First Reviewer: Prof. Dr.-Ing. G. Fischer

Second Reviewer: Dr.-Ing. M. Albrecht, PMDTechnologies

Cologne, February 2011

## Kurzbeschreibung

|                  |   |
|------------------|---|
| Titel:           | Evaluierung und Analyse von Objektivparametern hinsichtlich der Bewertung von Objektiven für laufzeitmessende PMD-Kamerasysteme   |
| Autorin:         | Ilona Schwengber  |
| Referenten:      | Prof. Dr.-Ing. Gregor Fischer, FH Köln<br>Dr.-Ing. Martin Albrecht, PMDTechnologies, Siegen   |
| Zusammenfassung: | In der vorliegenden Bachelorarbeit werden Objektive und deren Eigenschaften hinsichtlich ihrer Eignung für die Time-of-Flight Technologie in Verwendung mit dem PMD[vision]®CamCube3.0 untersucht. Dabei wird zunächst die Scharfstellung geprüft und analysiert. Desweiteren werden System-MTF-Kurven von verschiedenen Objektiven in unterschiedlichen Entfernungen gemessen. Die Objektive werden untereinander verglichen und die gemessenen Werte den Hersteller-MTF-Kurven gegenübergestellt. Außerdem wird eine Simulation zur Berechnung des aus einer nicht perfekten Modulationsübertragung resultierenden Phasenfehlers durchgeführt und analysiert. |
| Stichwörter:     | Time of Flight, Modulationsübertragungsfunktion, PMD, Objektivparameter, Objektivcharakterisierung  |
| Datum:           | 21. Februar 2011  |

# Abstract

**Title:** Evaluation and analysis of lens parameters concerning the rating of lenses for time-of-flight PMD-Camerasystems

**Author:** Ilona Schwengber

**Reviewers:** Prof. Dr.-Ing. Gregor Fischer, FH Köln  
Dr.-Ing. Martin Albrecht, PMDTechnologies, Siegen

**Abstract:** In this bachelor thesis lenses and their features concerning their qualification for the time-of-flight technology in use with the PMD[vision]@CamCube3.0 are evaluated. First the focus is tested and analyzed. Furthermore, system-MTF-curves of different lenses and different distances are measured. The lenses are compared to each other and the measured values are matched against the MTF-curves of the manufacturer. Additionally, a simulation for the calculation of the phase-error resulting from an imperfect modulation transfer is implemented and analyzed.

**Keywords:** time-of-flight, modulation transfer function, PMD, lens-parameters, lens characterization

**Date:** 21. February 2011

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinen Referenten Prof. Dr.-Ing. Gregor Fischer und Dr.-Ing. Martin Albrecht für die wissenschaftliche Betreuung und Unterstützung meiner Bachelorarbeit bedanken. Außerdem bedanke ich mich bei der Firma PMDTechnologies mit Geschäftsführer Dr.-Ing. Bernd Buxbaum für die Bereitstellung und Finanzierung dieser Arbeit, sowie den Mitarbeitern, insbesondere Jochen Penne, Holger Bette, Martin Kramer und Joachim Mosen, für ihr allzeit offenes Ohr, die vielen Tipps und guten Ratschläge. Für eine tolle Studienzeit und großartige Lerngruppen, ohne die ich bestimmt nie so weit gekommen wäre, geht mein Dank an meine Kommilitonen und Freunde Heike, Lulu, Roman, Christian, Dominik und Markus. Es hat viel Spaß gemacht mit Euch! Des Weiteren bedanke ich mich bei meinen Eltern, die mir dieses Studium ermöglicht und stets an mich geglaubt haben. Ohne Euch wäre ich nicht hier. Nicht zuletzt gilt mein Dank meiner Freundin Aga. Danke, dass Du immer für mich da bist.

# Inhaltsverzeichnis

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung .....</b>                                     | <b>1</b>  |
| 1.1      | PMD Technologies .....                                      | 1         |
| 1.2      | Motivation und Überblick dieser Arbeit .....                | 1         |
| <b>2</b> | <b>Grundlagen.....</b>                                      | <b>3</b>  |
| 2.1      | Time-of-Flight Prinzip.....                                 | 3         |
| 2.2      | PMD Prinzip.....  | 4         |
| 2.2.1    | PMD Time-of-Flight.....                                     | 4         |
| 2.2.2    | Chipaufbau.....   | 5         |
| 2.2.3    | Korrelationsfunktion .....                                  | 7         |
| 2.2.4    | 4-Phasen-Algorithmus (trigonometrische Interpolation) ..... | 7         |
| 2.2.5    | Systematischer Fehler .....                                 | 9         |
| 2.3      | Optik.....  | 10        |
| 2.3.1    | Optische Abbildung.....                                     | 10        |
| 2.3.2    | Beugungsbegrenzung.....                                     | 10        |
| 2.3.3    | Schärfe und Tiefenschärfe.....                              | 11        |
| 2.3.4    | Modulationsübertragungsfunktion.....                        | 13        |
| <b>3</b> | <b>Messreihen und Experimente.....</b>                      | <b>16</b> |
| 3.1      | Verwendete Kamera .....                                     | 16        |
| 3.2      | Auflösungsvermögen .....                                    | 16        |
| 3.2.1    | Ziel .....  | 16        |
| 3.2.2    | Nyquist-Frequenz des Sensors .....                          | 16        |
| 3.2.3    | Beugungsbegrenzung.....                                     | 17        |
| 3.2.4    | Fazit .....   | 17        |
| 3.3      | Schärfe und Schärfentiefe .....                             | 18        |
| 3.3.1    | Ziel / Motivation .....                                     | 18        |
| 3.3.2    | Scharfeinstellung bisher.....                               | 18        |
| 3.3.3    | Berechnungen.....   | 18        |
| 3.3.4    | Ergebnisse .....  | 19        |
| 3.4      | MTF.....  | 22        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.4.1    | Ziel .....                                       | 22        |
| 3.4.2    | Verwendete Objektive.....                        | 23        |
| 3.4.3    | Messverfahren .....                              | 23        |
| 3.4.4    | Testchart / Aufbau.....                          | 24        |
| 3.4.5    | Durchführung .....                               | 25        |
| 3.4.6    | Auswertung .....                                 | 28        |
| 3.5      | Vergleich mit MTF – Kurven des Herstellers ..... | 35        |
| 3.5.1    | Ziel .....                                       | 35        |
| 3.5.2    | Probleme.....                                    | 35        |
| 3.5.3    | Vergleich .....                                  | 36        |
| 3.5.4    | Fazit .....                                      | 36        |
| 3.6      | Phasenfehler Simulation.....                     | 37        |
| 3.6.1    | Ziel .....                                       | 37        |
| 3.6.2    | Simulation .....                                 | 37        |
| 3.6.3    | Ergebnisse .....                                 | 39        |
| 3.6.4    | Anwendungsbeispiel für die Praxis.....           | 44        |
| <b>4</b> | <b>Diskussion.....</b>                           | <b>50</b> |
| <b>5</b> | <b>Ausblick.....</b>                             | <b>51</b> |
| <b>6</b> | <b>Zusammenfassung.....</b>                      | <b>51</b> |
| <b>7</b> | <b>Anhang .....</b>                              | <b>53</b> |
| 7.1      | Umrechnung Linienpaare Bildebene / Szene.....    | 53        |
| 7.2      | Kurven vertikale MTF.....                        | 53        |
| 7.3      | Literaturverzeichnis.....                        | 55        |
| 7.4      | Abbildungsverzeichnis .....                      | 57        |
| 7.5      | Weiterer Anhang.....                             | 58        |
| 7.6      | Eidesstattliche Erklärung .....                  | 59        |
| 7.7      | Sperrvermerk .....                               | 59        |
| 7.8      | Weitergabeerklärung .....                        | 59        |

# 1 Einleitung

## 1.1 PMD Technologies

PMDTechnologies wurde 2002 nach über 10 Jahren Grundlagenforschung als Spin-Off Unternehmen des Zentrums für Sensor Systeme (ZESS) der Universität Siegen gegründet. Mittlerweile hat sich die Firma zum weltweit führenden Anbieter von Sensoren für Time-of-Flight (ToF) Anwendungen entwickelt und ist zu jeweils 50% eine Tochterfirma der Audi Electronics Venture GmbH und der ifm electronics GmbH. PMDTechnologies besitzt über 25 weltweite Patente, weitere 40 sind angemeldet. PMD Sensoren finden vor allem in den Bereichen Industrie und Automotive Anwendung, aber auch in weiteren Bereichen wie Unterhaltungselektronik, Medizin, Sicherheit und Überwachung ist die ToF – Technologie auf dem Vormarsch.

## 1.2 Motivation und Überblick dieser Arbeit

PMDTechnologies ist in erster Linie Chiphersteller und -lieferant. Um Kunden die Leistungsfähigkeit der Sensoren demonstrieren zu können und Ihnen den Einstieg in die ToF-Technologie zu erleichtern, werden jedoch auch Prototypen von Kameras gefertigt.

Das Objektiv als abbildendes Element einer Kamera beeinflusst mit seinen optischen Übertragungseigenschaften maßgeblich die Bildqualität einer Kamera und ist somit auch für ToF-Kameras ein wesentlicher Qualitätsparameter. In dieser Arbeit sollen deshalb einige Objektiveigenschaften und deren Auswirkungen auf die ToF-Messungen untersucht werden.

Da es sich bei PMD bzw. bei der Time-of-Flight-Technologie um sehr spezielle Anwendungen handelt, stellt sich die Frage, ob und wie herkömmliche Objektivparameter, die zur Beurteilung der Abbildungsqualität im 2D-Raum verwendet werden, zur Bewertung der Eignung eines Objektivs für ToF-Messungen herangezogen werden können.



Bisher wurde bei der Auswahl der Objektive hauptsächlich auf eine große Lichtstärke und die vom Hersteller angegebenen MTF-Werte geachtet. Es soll daher in der vorliegenden Arbeit untersucht werden, ob diese Auswahlkriterien ausreichen, und inwieweit die Verwendung eines sehr lichtstarken Objektivs auf Kosten der Abbildungsleistung und Schärfentiefe geht. Ebenfalls soll untersucht werden, welche MTF-Werte für die ToF-Technologie benötigt werden.

Die Tests werden mit der von PMDTechnologies entwickelten Kamera PMD[vision]<sup>®</sup>CamCube3.0 (Abbildung 1-1) in Kombination mit verschiedenen Objektiven durchgeführt.



Abbildung 1-1 PMD[vision]<sup>®</sup>CamCube3.0 (Foto: M. Kramer)

## 2 Grundlagen

### 2.1 Time-of-Flight Prinzip

Das Time-of-Flight Prinzip, auch Echolaufzeitmessung genannt, ist ein Verfahren für die berührungslose Distanzmessung. Bei diesem Verfahren wird ein Lichtsignal ausgesendet und die Laufzeit (Time-of-Flight) dieses Signals vom Sender zum Ziel und zurück zum Empfänger gemessen. Aus der Lichtgeschwindigkeit und der Laufzeit kann die Entfernung  $d$  zwischen Sender und Empfänger berechnet werden.

Aufgrund der hohen Geschwindigkeit des Lichts muss dabei die Laufzeit des Signals mit einer Genauigkeit von Pikosekunden gemessen werden, um eine Genauigkeit in der Distanzmessung im Millimeterbereich zu erreichen. Dafür wird eine sehr hohe Bandbreite der diskreten Systemkomponenten benötigt [1].

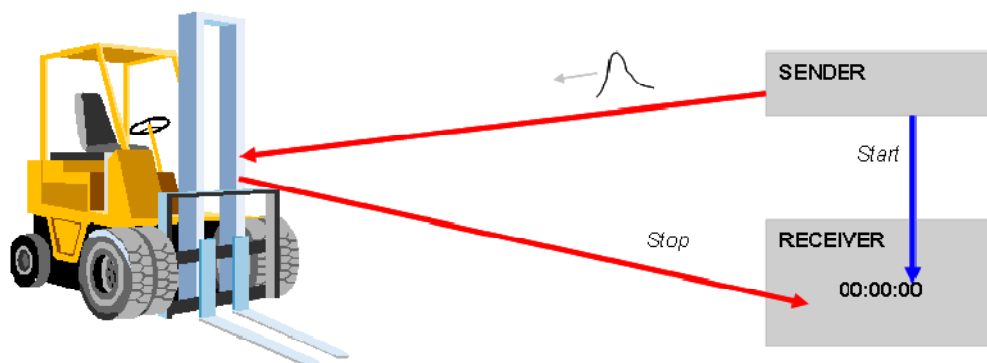


Abbildung 2-1 Time-of-Flight - Prinzip, entnommen aus [1]

## 2.2 PMD Prinzip

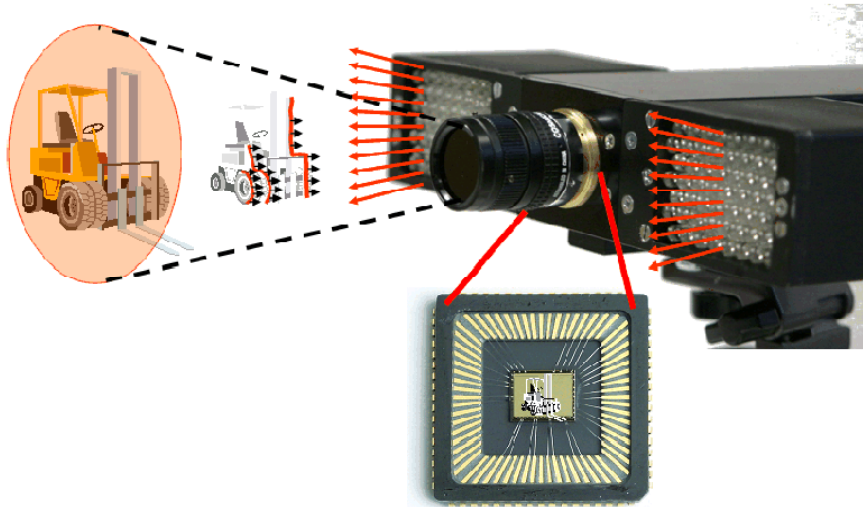


Abbildung 2-2 PMD Time-of-Flight, entnommen aus [1]

### 2.2.1 PMD Time-of-Flight

Bei PMD wird das Time-of-Flight Prinzip verwendet. Hier wird nicht wie in Abbildung 2-1 gezeigt, ein einzelner Lichtpuls ausgesendet, mit dem die Szene gescannt wird, sondern es wird modulierte Licht verwendet, welches die Szene als Ganzes illuminiert. Die Distanz kann hierbei aus der Phasenverschiebung des empfangenen Signals gegenüber dem ausgesendeten Signal in jedem Pixel parallel bestimmt werden. Der Vorteil dieser Methode liegt in der Schnelligkeit der Messung, außerdem wird durch die Phasenermittlung auch keine so hohe Bandbreite benötigt. Dadurch, dass das Licht über die gesamte Szene verteilt wird, ist allerdings eine hohe optische Leistung nötig, auch kann es zu unerwünschten Mehrfachreflexionen in der Szene kommen. Ebenso können Bewegungsartefakte durch teils benötigte lange Integrationszeiten (äquivalent zu Belichtungszeit in der Normalfotografie) entstehen.

### 2.2.2 Chipaufbau

PMD-Sensoren basieren auf der CMOS-Technologie. Ein PMD-Sensor ist ein lichtempfindliches Halbleiter-Bauelement, in welchem einfallendes Licht in Ladungen umgesetzt wird. Jeder PMD-Pixel besitzt transparente Photogates, über die der Ladungstransport zu zwei unabhängigen Auslesedioden kontrolliert werden kann. Abbildung 2-3a zeigt einen schematischen Querschnitt eines solchen Pixels, die Photogates sind gelb dargestellt.

Die Gates  $G_A$  und  $G_B$  sind im Gegentakt mit einer Rechteck-Funktion moduliert, wodurch ein Potentialgradient entsteht. Angenommen, es trifft kontinuierlich Licht auf den Sensor, so wird die dadurch generierte Ladung abwechselnd, aber im Mittel gleichmäßig zu den Auslesekanälen A und B transportiert (Abbildung 2-3b).

Ist die Modulation von Gate  $G_A$  in Phase mit dem optischen Signal und Gate  $G_B$  genau gegenläufig dazu, so werden bei einer Phasenverschiebung von  $0^\circ$  idealerweise alle im Halbleiter generierten Elektronen zu Auslesearm A transportiert (Abbildung 2-4a). Beträgt die Phasenverschiebung  $180^\circ$ , tritt der entgegengesetzte Fall ein, die gesamte generierte Ladung wird zu Auslesearm B geleitet (Abbildung 2-4c). Für alle anderen Phasen werden anteilig Elektronen auf beide Seiten transportiert.

Aus der unterschiedlichen Verteilung der Elektronen auf beide Auslesekanäle (Differenz der Ladungen  $U_a - U_b$ ) kann die Distanz zum Objekt in der Szene berechnet werden, Beispiele zeigt Abbildung 2-4.

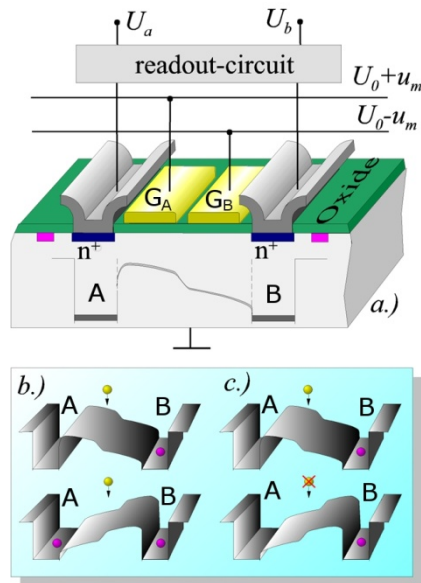


Abbildung 2-3 PMD-Pixel Querschnitt, entnommen aus [1]

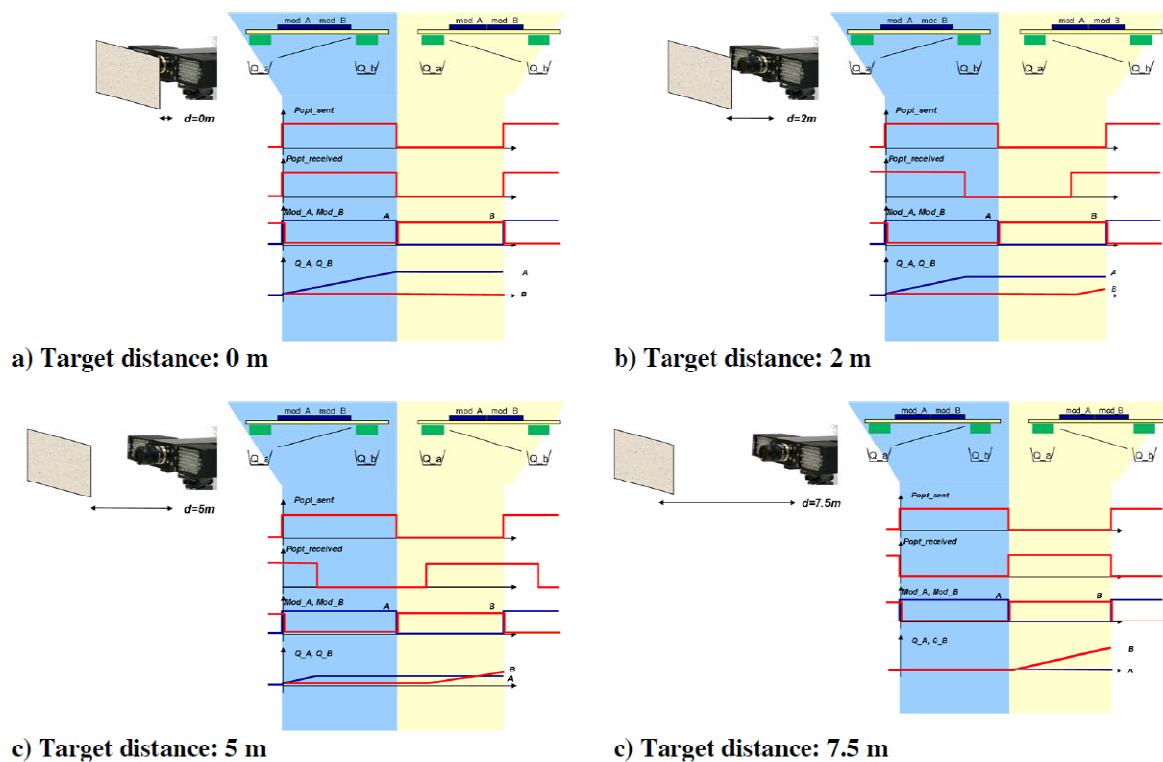


Abbildung 2-4 Ladungsverteilung bei unterschiedlicher Zieldistanz, entnommen aus [1]

### 2.2.3 Korrelationsfunktion

Die Korrelation ist ein Maß für die Ähnlichkeit zweier Funktionen oder Signale zueinander. Im Folgenden wird die Korrelation des optischen (Lichtmodulation) mit dem elektrischen Signal (Chipmodulation) Korrelationsfunktion, kurz: KF genannt. Da es sich hierbei um die Korrelation zweier Rechteckfunktionen handelt, hat die KF die Form einer Dreiecksfunktion. Um die Distanz zwischen Kamera und Objekt zu errechnen, muss diese KF bestimmt werden, da die Phase der Funktion proportional zur Distanz ist. Außerdem ist die Amplitude ein Maß für die Reflektivität und liefert somit einen Grauwert.

### 2.2.4 4-Phasen-Algorithmus (trigonometrische Interpolation)

Aus einer einzelnen Messung lässt sich die KF jedoch nicht bestimmen, da die Parameter Offset, Phase und Amplitude unbekannt sind. Aus mathematischer Sicht sind aufgrund der drei Unbekannten somit mindestens drei Messwerte nötig, in der Praxis werden hingegen 4 Messungen vorgenommen, da dies technisch wesentlich leichter umzusetzen ist. Hierzu werden 4 Aufnahmen mit unterschiedlich phasenverschobenem optischen Signal  $A_1=0^\circ$ ,  $A_2=90^\circ$ ,  $A_3=180^\circ$ ,  $A_4=270^\circ$  gegenüber der Chipmodulation erstellt. Durch diese 4 Stützstellen kann die KF eindeutig bestimmt werden, da deren Funktionsverlauf in Form einer Dreiecksfunktion bereits bekannt ist.

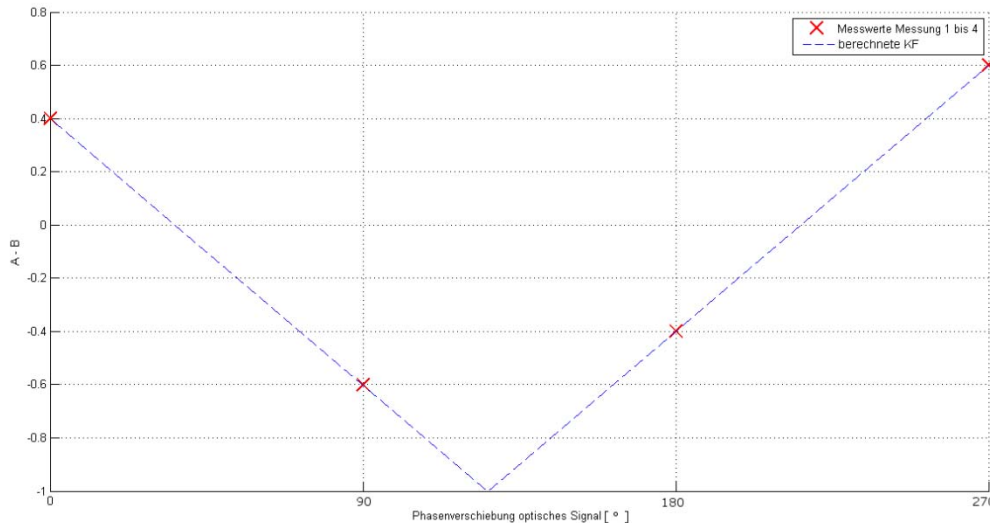


Abbildung 2-5 Korrelationsfunktion berechnet aus 4 Stützstellen

Die Phase der KF wird dann wie folgt berechnet:

$$\varphi = \arctan \left( \frac{A_1 - A_3}{A_2 - A_4} \right) \quad (1)$$

Die Werte  $A_1$  bis  $A_4$  entsprechen hierbei der Differenz aus Auslesekanal A und B. Durch die Verwendung der Differenzwerte können unterschiedliche Offsets ausgeglichen werden, da in der Praxis nicht beide Kanäle den gleichen Startwert haben (Fixed Pattern Noise).

Aus der Phase  $\varphi$  ergibt sich die Distanz zwischen Kamera und Objekt über die Lichtgeschwindigkeit  $c$  :

$$d = \frac{c \cdot \varphi}{4\pi f_{mod}} \quad (2)$$

Der Eindeutigkeitsbereich für diese Distanzberechnung ist aufgrund der Periodizität der Signale beschränkt. Aus einer Modulationsfrequenz  $f_{mod}$  von z.B. 20MHz ergibt sich die Wellenlänge  $\lambda_{mod} = 15\text{m}$ , und daraus der Eindeutigkeitsbereich von

$$d_{max} = \frac{\lambda_{mod}}{2}, \quad (3)$$

also 7,5 m, da das Signal innerhalb einer Periode Hin- und Rückweg zurücklegen muss.

Aus der KF kann außerdem die Amplitude  $a$  berechnet werden, welche der Signalstärke des empfangenen Signals entspricht und sich aus

$$a = \frac{\sqrt{(A_1 - A_3)^2 + (A_2 - A_4)^2}}{2} \quad (4)$$

ergibt.

Ebenso lässt sich die Intensität  $I$  (Grauwert) berechnen. Die Intensität entspricht der Summe der Ladungen in beiden Auslesekanälen.

$$I = \frac{1}{4} \sum_{n\varphi} (A + B) \quad (5)$$

### 2.2.5 Systematischer Fehler

Bei Berechnung der Phase mit Hilfe der trigonometrischen Interpolation (1) wird der Arkustangens verwendet, welcher auf der Sinusfunktion beruht. Da die KF aber keine Sinusfunktion sondern eine Dreiecksfunktion darstellt, kommt es bei der Berechnung der Phase zu einem Fehler, welcher aber systematisch und damit korrigierbar ist (Abbildung 2-6). Dieser sogenannte Wiggling-Fehler liegt im Bereich von maximal etwa  $\pm 4^\circ$ . Da er bereits in vielen Arbeiten untersucht und beschrieben wurde [2] [3], soll hier nicht näher darauf eingegangen werden. In die Berechnung der Simulation in Kapitel 3.6 wird der Wiggling-Fehler mit einbezogen.



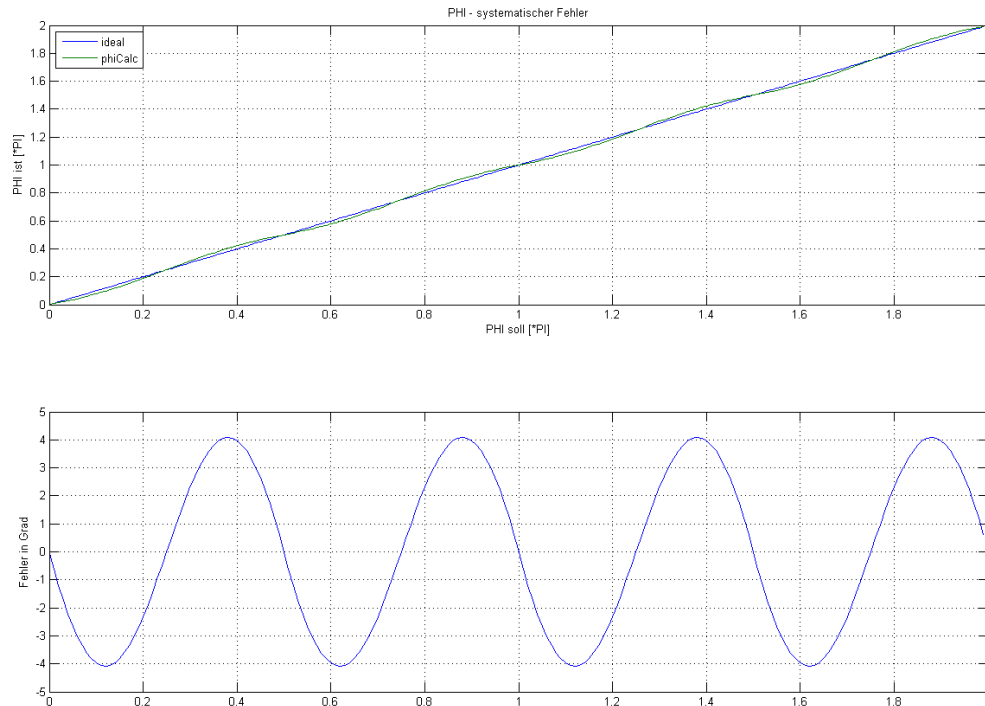


Abbildung 2-6 Systematischer Fehler

## 2.3 Optik

### 2.3.1 Optische Abbildung

Durch ein optisches System wird ein Punkt im Objektraum im Idealfall im Bildraum ebenfalls als Punkt abgebildet. In der Realität ist dies aufgrund von verschiedenen Einflüssen wie Abbildungsfehlern, Fertigungstoleranzen und Beugung jedoch nicht der Fall. Ein Punkt wird immer als Fläche abgebildet, wobei diese weder rund sein noch eine gleichmäßige Intensitätsverteilung haben muss. Diese Abbildung eines Punktes als Fläche wird Punktausbreitungsfunktion (engl. Point spread function) genannt.

### 2.3.2 Beugungsbegrenzung

Angenommen, ein Objektiv sei perfekt ausgelegt und gefertigt, so ist die Abbildungsqualität dennoch aufgrund der Wellennatur des Lichtes beugungsbegrenzt. Aus einem Punkt im Objektraum entsteht im Bildraum kein ideal kleiner Bild-

punkt, sondern ein sogenanntes Beugungsscheibchen, welches aus einem hellen Zentrum besteht und an das sich nach außen hin eine Folge von hellen und dunklen Ringen anschließt [4]. Der Durchmesser dieses hellen Zentrums des Beugungsscheibchens (Airy Disk Diameter ADD) hängt ab von der Blendenzahl  $k$  und der Wellenlänge des Lichts und wird definiert als

$$ADD = 2,44 \cdot k \cdot \lambda \quad (6)$$

mit 
$$k = \frac{f'}{D_{EP}} \quad (7)$$

Dabei bezeichnet  $f'$  die Brennweite des Objektivs, und  $D_{EP}$  den Durchmesser der Eintrittspupille.

Die maximal auflösbare Ortsfrequenz in Linienpaaren<sup>1</sup> pro mm (Diffraction Limit DL) einer perfekten Optik ergibt sich aus

$$DL = \frac{1}{D_{EP} \cdot \lambda} \quad (8)$$

### 2.3.3 Schärfe und Schärfentiefe

Nur eine senkrecht zur optischen Achse stehende Ebene kann durch ein optisches System optimal scharf abgebildet werden. Objekte in der Entfernung  $a$  zum Objektiv werden in Abhängigkeit von der Brennweite  $f'$  im Abstand  $a'$  scharf abgebildet<sup>2</sup>:

$$\frac{1}{f'} = -\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} \quad (9)$$

<sup>1</sup> Die Periode eines Linienpaares ist die Breite eines dunklen und eines hellen Streifens. Die Anzahl der Perioden pro mm in der Bildebene ist die Ortsfrequenz, meist angegeben in der Einheit Linienpaare pro mm [6] oder Linienpaare pro Pixel.

<sup>2</sup> Gleichung (9) und alle weiteren optischen Gleichungen in dieser Arbeit basieren auf der Vorzeichenkonvention nach DIN 1335 [5], vergl. Abbildung 2-7.

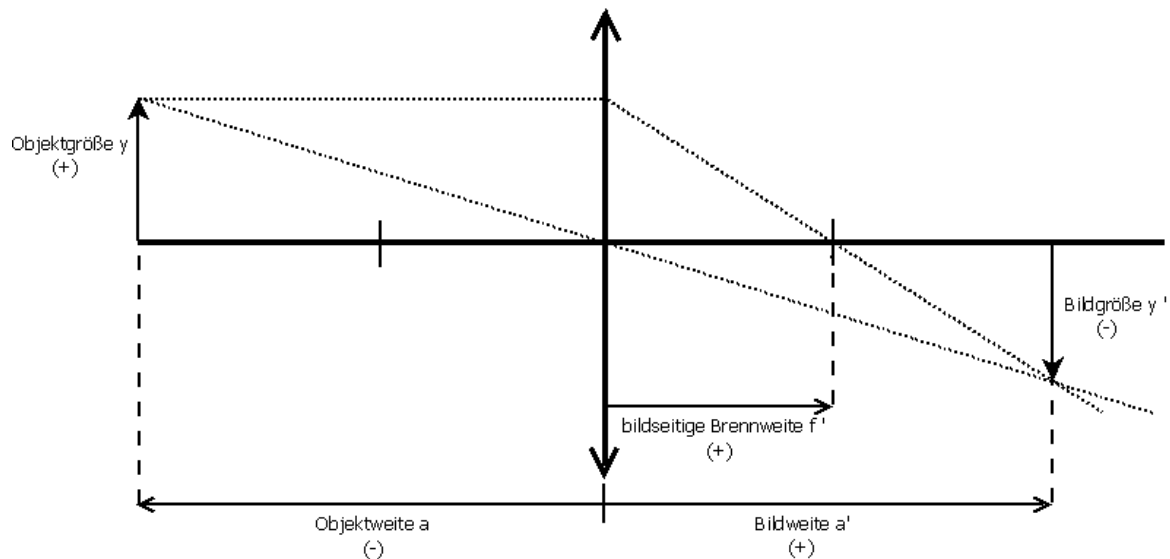


Abbildung 2-7 Optische Abbildung, Vorzeichenkonvention nach DIN 1335 [5]

Der Abbildungsmaßstab  $\beta'$  wird dabei definiert als

$$\beta' = \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a} = \frac{f'}{a + f'} \quad (10)$$

Befinden sich Objekte vor oder hinter dieser Ebene, werden diese auf dem Sensor unscharf abgebildet. Solange diese Unschärfe jedoch kleiner oder gleich der Größe eines Pixels ist, bleibt die Unschärfe ohne Auswirkung. Der Bereich im Objektraum, für den der zulässige Unschärfekreisdurchmesser  $u'$  in der Sensorebene kleiner oder gleich dem Pixeldurchmesser ist, wird Schärfentiefe (Depth of field) genannt. Die Größe dieses Bereichs hängt von der Brennweite  $f$  und der Blendenzahl  $k$  des Objektivs, sowie der Entfernung der Schärfeebene (Einstellebene  $a$ ) zum Objektiv und dem zulässigen Unschärfekreisdurchmesser  $u'$  ab.

Vordere Schärfentiefegrenze:

$$a_v = \frac{a \cdot f'^2}{f'^2 - u' \cdot k \cdot (a + f')} \quad (11)$$

Hintere Schärfentiefe Grenze:

$$a_h = \frac{a \cdot f'^2}{f'^2 + u' \cdot k \cdot (a + f')} \quad (12)$$

### 2.3.4 Modulationsübertragungsfunktion

Um die Abbildungsqualität eines Objektivs zu beschreiben, genügt es nicht, dessen Auflösungsvermögen in Linienpaaren pro mm anzugeben. Es ist ebenso wichtig, Angaben zur Fähigkeit der Kontrastübertragung zu machen, da die Linien nicht nur getrennt, sondern auch mit ausreichendem Kontrast wiedergegeben werden müssen. Kontrast (oder auch Modulation) wird in der Optik wie folgt definiert [4] [6]

$$K = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}} \quad (13)$$

Mit L ist hier die Leuchtdichte gemeint, stellvertretend dafür kann aber auch jede andere photometrische Größe eingesetzt werden [7], beispielsweise der Reflexionsgrad oder Transmissionsgrad.

Durch Abbildungsfehler der Optik, Beugung und Streulichte effekte ist der Bildkontrast immer kleiner als der Objektkontrast. Das Verhältnis von Bildkontrast zu Objektkontrast heißt Modulationsübertragungsfaktor. Je höher die Ortsfrequenz  $\nu$ , also die Detailfeinheit, ist, desto mehr nimmt der MTF-Faktor ab, die Modulationsübertragung muss daher in Abhängigkeit von der Ortsfrequenz  $\nu$  angegeben werden [4] [7].

$$MTF(\nu) = \frac{K(\nu)_{Bild}}{K(\nu)_{Objekt}} \quad (14)$$

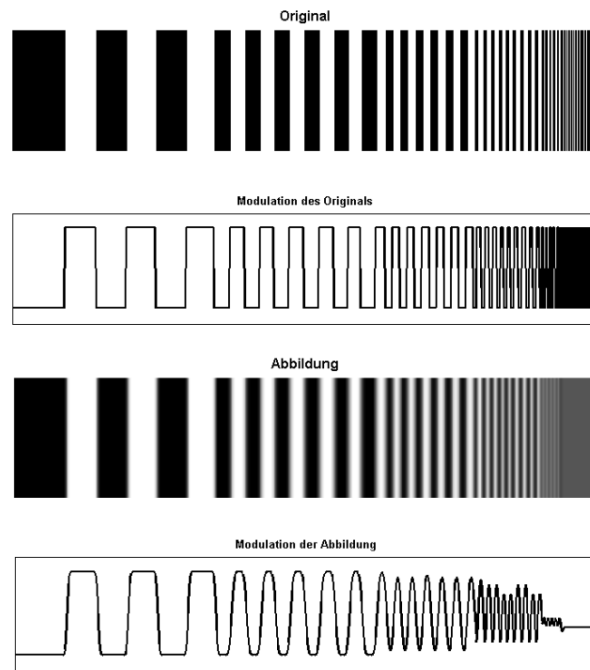


Abbildung 2-8 Modulation Original / Abbildung

Die MTF ist außerdem von vielen weiteren Parametern, wie der Richtung der Ortsfrequenz, der Position am Objektiv, der Blende, der Fokussierung und der Wellenlänge des Lichts abhängig. Eine einzelne MTF Kurve reicht also nicht aus, um ein Objektiv zu beschreiben, die gesamte Abbildungsleistung eines Objektivs kann nur durch einen größeren Satz von MTF-Kurven beschrieben werden. [6]

In einem optischen System wird die gesamte MTF nicht nur durch das Objektiv, sondern auch durch jede weitere Komponente bestimmt. Die Multiplikation der MTF der einzelnen Komponenten ergibt die MTF des Systems [4].

$$MTF_{System} = MTF_{Objektiv} \cdot MTF_{Sensor} \cdot .... \quad (15)$$

In dieser Arbeit wird die MTF des Systems ermittelt, da nur in Kombination mit dem PMD-Sensor Rückschlüsse der MTF auf die Bedeutung für die ToF-Technologie gezogen werden können.

In der Literatur wird statt MTF auch der Begriff Spatial Frequency Response (SFR) verwendet.

### 2.3.4.1 Bedeutung der MTF

Was bedeutet nun ein MTF-Wert von beispielsweise 0,5? Dies soll anhand eines Beispiels erläutert werden:

Gegeben sei ein Intensitätsverhältnis in der Szene von  $I_{\max}$  zu  $I_{\min} = 20:1$ . Dies entspricht laut (13) einem Objektkontrast von 0,9. Bei einem Kontrastübertragungsfaktor von 0,5 ergibt sich daraus nach (14) ein Bildkontrast von 0,45, welcher wiederum nach (13) einem Intensitätsverhältnis im Bild von 2,64:1 entspricht. Ein Intensitätsverhältnis von 20:1 wird also durch eine MTF von 0.5 auf ein Intensitätsverhältnis von 2,64:1 reduziert.

Wie ist aber das resultierende Intensitätsverhältnis im Bild abhängig von der MTF und dem Intensitätsverhältnis in der Szene zusammengesetzt?

Der Bildkontrast ergibt sich nach (13) und (14) wie folgt:

$$K_{Bild} = K_{Objekt} \cdot MTF = \frac{I_{pix1} - I_{pix2}}{I_{pix1} + I_{pix2}} = \left( \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \right) \cdot MTF \quad (16)$$

mit  $I_{pix1}, I_{pix2}$  = Intensität im Bild und  $I_1, I_2$  = Intensität in der Szene

Das resultierende Intensitätsverhältnis im Bild ist daher folgendermaßen zusammengesetzt:

$$\frac{I_{pix1}}{I_{pix2}} = \frac{I_1(1 + MTF) + I_2(1 - MTF)}{I_1(1 - MTF) + I_2(1 + MTF)} \quad (17)$$

## 3 Messreihen und Experimente

### 3.1 Verwendete Kamera

Für alle Versuche wird der von PMDTechnologies entwickelte Kamera-Prototyp PMD[vision]<sup>®</sup>CamCube3.0 verwendet. Dieser verfügt über zwei Beleuchtungseinheiten links und rechts neben dem Objektiv, die Licht der Wellenlänge 870nm moduliert ausstrahlen. Die Modulation wird vom PMD-Chip gesteuert. Für die Messung einer 4m entfernten Fläche mit 75% Reflektivität wird eine Wiederholgenauigkeit der Messung von <3mm erzielt. [8] Die Kamera kann mit der Software MATLAB angesteuert und ausgelesen werden, außerdem kann das von PMDTec entwickelte Programm CamVis zur Anzeige der Daten verwendet werden.

### 3.2 Auflösungsvermögen

#### 3.2.1 Ziel

Die erste Frage ist, ob hauptsächlich der PMD-Sensor das Auflösungsvermögen begrenzt oder die Beugungsbegrenzung eine Rolle spielt. Dies soll zunächst berechnet werden.

#### 3.2.2 Nyquist-Frequenz des Sensors

Der Sensor des PMD[vision]<sup>®</sup>CamCube3.0 verfügt über 200x200 Pixel mit jeweils 45x45µm Größe. Aufgrund der platzsparenden Anordnung der pixelnahen Schaltungselektronik ergibt sich jedoch ein nicht äquidistanter Abstand der lichtempfindlichen Bereiche, die lichtempfindliche Fläche beträgt nur 45µm x 25µm. Vertikal ist der Abstand zwischen den sensitiven Bereichen überall gleich und minimal, während horizontal die Abstände wegen der Abschirmung durch die Pixel-elektronik unterschiedlich sind (Abbildung 3-1). Für die Berechnung der Nyquist-Frequenz wird der vertikale Pixelabstand verwendet.

Die maximal auflösbare Ortsfrequenz eines zum Beispiel schwarz-weißen Streifenmusters ist diejenige, bei der die Pixel abwechselnd einen schwarzen und ei-

nen weißen Streifen aufnehmen. Ein schwarzer und ein weißer Streifen werden zusammen als ein Linienpaar bezeichnet. Für den PMD-Sensor ergibt sich eine minimale Periodenlänge des schwarz-weiß-Musters von  $90\mu\text{m}$  und dementsprechend eine Grenzfrequenz von  $\frac{1}{90\mu\text{m}} = 11,11 \frac{\text{lp}}{\text{mm}}$  (Linienpaare pro mm). Höhere Frequenzen, also feinere Details kann der Sensor nicht mehr auflösen, es entstehen Alias-Artefakte.

### 3.2.3 Beugungsbegrenzung

Die Beleuchtungseinheit des PMD[vision]<sup>®</sup> CamCube3.0 sendet Licht der Wellenlänge  $\lambda = 870\text{nm}$  aus. Angenommen, das Standard Objektiv der Kamera mit der Brennweite von  $12,8\text{mm}$  und einem Öffnungsverhältnis von  $1:1,1$  sei perfekt, würde dies nach (8) ein Beugungslimit von  $98,78 \frac{\text{lp}}{\text{mm}}$  bedeuten. Der Durchmesser des Beugungsscheibchens ist in diesem Fall etwa  $2,34\mu\text{m}$  groß.

### 3.2.4 Fazit

Die Berechnungen machen deutlich, dass hauptsächlich der Sensor das auflösungsbegrenzende Element im System ist. Beugungseffekte spielen also in der weiteren Betrachtung keine Rolle.

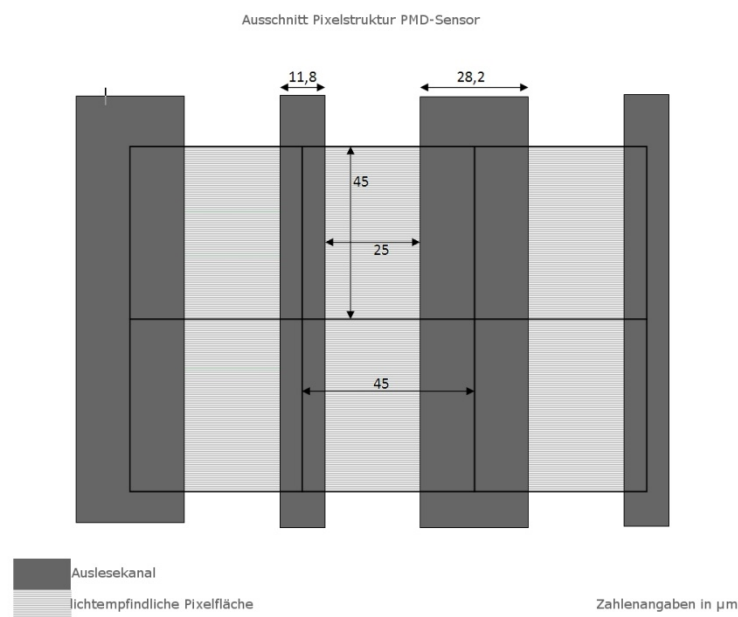


Abbildung 3-1 Pixelstruktur PMD-Sensor (Ausschnitt)



### 3.3 Schärfe und Schärfentiefe

#### 3.3.1 Ziel / Motivation

Wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben, kann nur eine senkrecht zur optischen Achse stehende Ebene durch ein optisches System auf dem ebenfalls senkrecht zur optischen Achse angebrachten Sensor scharf abgebildet werden. Der Schärfentiefebereich erstreckt sich allerdings über den Bereich, für den der zulässige Unschärfekreisdurchmesser  $u'$  nicht größer ist als der Durchmesser eines Pixels bzw. der Abstand von zwei Pixeln (Pixelpitch).

Da für PMD-Kameras bzw. deren Anwendung bei der Standard-Modulationsfrequenz von 20MHz ein Eindeutigkeitsbereich von 7,5 m (vergl. 2.2.4) gegeben ist, sollte sich idealerweise bis zu dieser Distanz auch die Schärfentiefe erstrecken. Ob dies der Fall ist, soll geprüft und ggf. verbessert werden.

#### 3.3.2 Scharfeinstellung bisher

Am CamCube befinden sich in der Regel Objektive ohne weitere Einstellmöglichkeit für den Anwender. Beim PMD[vision]<sup>®</sup>CamCube3.0 ist dies ein Objektiv mit 12,8mm Brennweite und Lichtstärke 1:1,1. Die Schärfe wird einmalig werksseitig bei PMD eingestellt und die Kamera so kalibriert. Die Scharfeinstellung wird mit einem Gittermuster in 1,35m Abstand zur Kamera vorgenommen. Dafür wird das Gewinde, in dem das Objektiv sitzt, gelöst und das gesamte Objektiv zum Sensor axial verschoben. Die Schärfe wird anhand des Grauwertbilds (Amplitudenbild) des Gittermusters visuell beurteilt. Entsprechend des visuellen Eindrucks der höchsten Schärfe wird das Gewinde mit dem Objektiv in der entsprechenden Position wieder festgeschraubt.

#### 3.3.3 Berechnungen

Mit den Formeln (11) und (12) für die vordere und hintere Schärfentiefegrenze wird zunächst die Schärfentiefe für die Einstellentfernung  $a=1,35\text{m}$  bei gegebener Blende und Brennweite berechnet. Danach wird berechnet, welche Schärfentiefe durch welche andere Einstellentfernung erreicht werden würde. Hierbei handelt es sich um Berechnungen mit Formeln der geometrischen Optik, in denen ein ideales System angenommen wird, das heißt Abbildungsfehler werden nicht berücksichtigt.

### 3.3.4 Ergebnisse

Bei einer Einstellentfernung von 1,35m erstreckt sich bei dem für die Berechnung als Beispiel gewählten Objektiv mit 12,8mm Brennweite und Blendenzahl  $k=1,1$  der Schärfentiefebereich von 0,96m bis 2,27m. Außerhalb dieses Bereichs ist der Unschärfekreisdurchmesser größer als der Pixelpitch von  $45\mu\text{m}$ . Um den Schärfentiefebereich weiter auszudehnen, müsste bei gleicher Einstellentfernung und Brennweite ein Objektiv mit kleinerer Blendenöffnung gewählt werden. Bei einer um  $\frac{2}{3}$  Blendenstufen kleineren Blendenöffnung von 1,4 erstreckt sich die Schärfentiefe zum Beispiel von 0,89m bis 2,78m. Um einen wesentlich höheren Schärfentiefebereich zu erhalten, müsste dementsprechend eine sehr viel kleinere Blendenöffnung gewählt werden, was aber in großem Konflikt mit der für eine akkurate Messung benötigten Lichtmenge steht. Um eine Messung mit hoher Bildwiederholrate und hoher Tiefenauflösung zu realisieren, ist es wichtig, eine ausreichende Menge des aktiv modulierten Lichts in einer möglichst kurzen Integrationszeit mit dem Sensor einzufangen. Deshalb ist eine möglichst große Lichtstärke des Objektivs für die Messung mit PMD-Sensoren essentiell. Bei der Verkleinerung der Blende um eine Blendenstufe wird die Lichtmenge aber bereits halbiert.

Würde alternativ bei gleicher Blendenzahl  $k=1,1$  stattdessen die Objektweite auf 2m eingestellt, so ergäbe sich insgesamt ein größerer Schärfentiefebereich von 1,25m bis 5m. Im vorderen Bereich würde dieser zwar weiter von der Kamera entfernt beginnen, sich jedoch im hinteren Bereich mit bis zu 5m deutlich weiter erstrecken (siehe schwarze Balken in Abbildung 3-2).

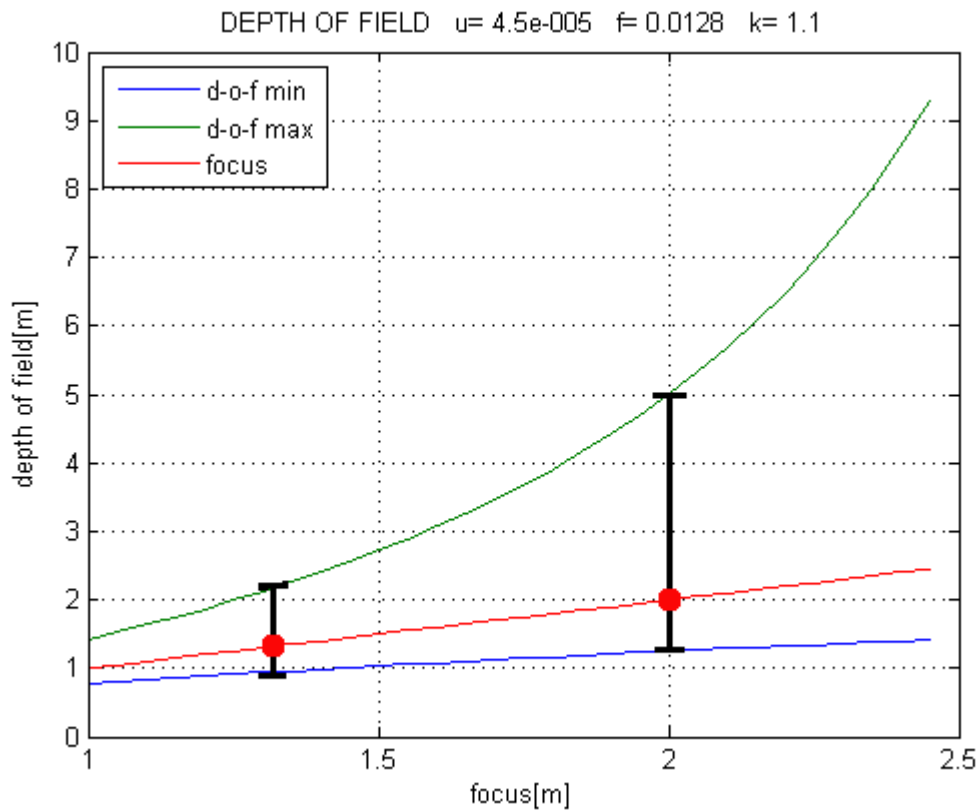


Abbildung 3-2 Schärfentiefe abhängig von der Einstellentfernung

Bei einer Betrachtung des Unschärfekreisdurchmessers abhängig von der Objektentfernung (Abbildung 3-3) zeigt sich außerdem, dass dieser bei einer Einstellentfernung auf 1,35m ab 7m Entfernung bereits größer als der 2-fache Pixelabstand ist. Bei einer Einstellentfernung von 2m ist der Unschärfekreisdurchmesser hingegen selbst bei 10m Objektentfernung noch kleiner als der 1,5-fache Pixelabstand.

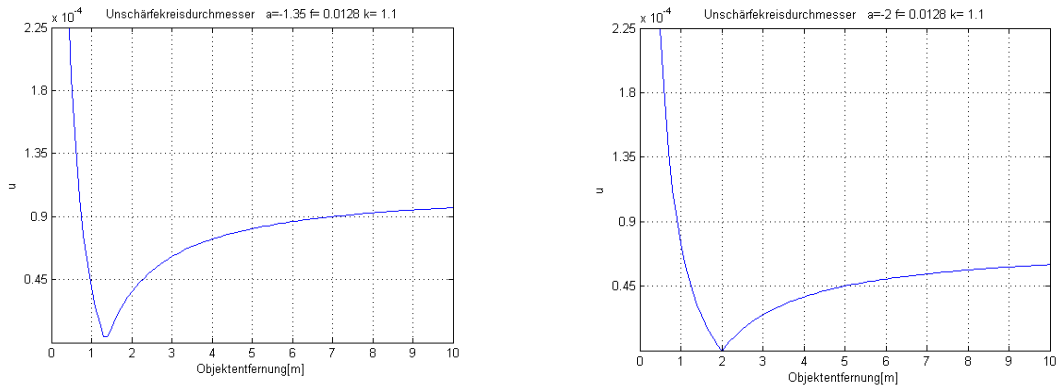


Abbildung 3-3 Unschärfekreisdurchmesser bei  $a=1,35\text{m}$  (links) und bei  $a=2\text{m}$  (rechts)

Es soll also aufgrund dieser Berechnungen die Scharfeinstellung auf 2m Entfernung getestet werden. Hierzu wird das Gittermuster, welches bisher zur Scharfeinstellung verwendet wurde, entsprechend des Abbildungsmaßstabs (10) vergrößert. Es stellt sich dabei jedoch heraus, dass die Scharfstellung wie in 3.3.2 beschrieben zu großen Schwankungen unterliegt, um die Einstellung tatsächlich auf einen exakten Wert einzustellen.

Analog zur objektseitigen Schärfentiefe existiert logischerweise auch eine bildseitige Schärfentiefe (Depth of focus), ein Toleranzbereich, innerhalb dessen sich der Sensor vor oder hinter der optimalen Bildebene befinden kann, ohne dass der Unschärfekreis größer als ein Pixel wird [9]. Die Formel zur Berechnung des Toleranzbereichs für die axiale Lageunsicherheit des Sensors ergibt sich bei endlicher Abbildung aus dem Strahlensatz und dem Zusammenhang zwischen Brennweite und Blendenzahl:

$$\Delta z = \pm \frac{u' \cdot k}{\left(1 - \frac{f'}{a}\right)} \quad (18)$$

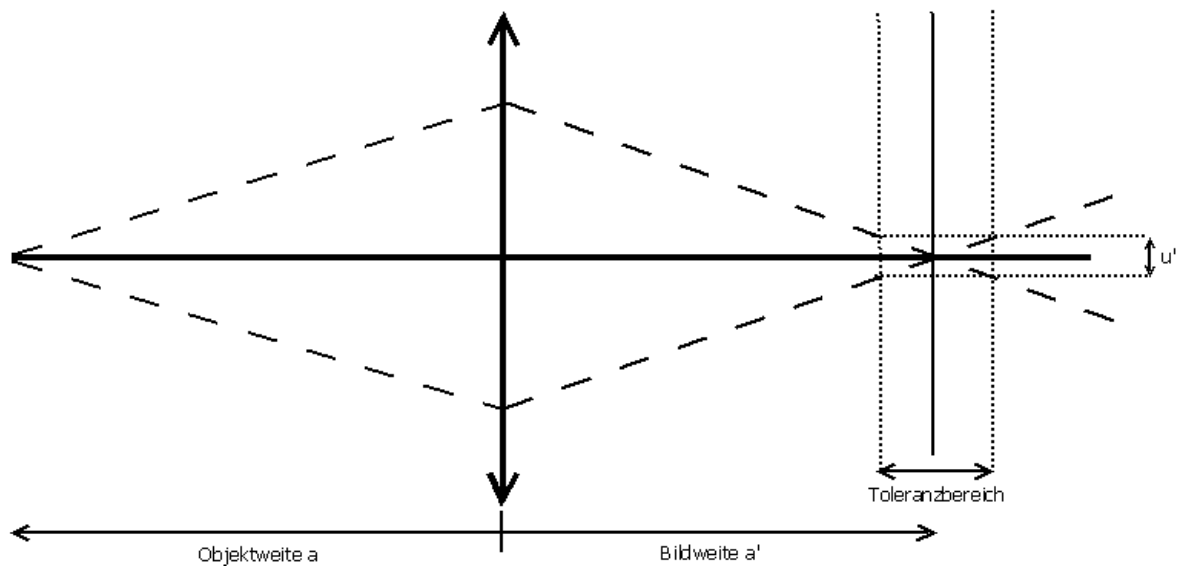


Abbildung 3-4 Toleranzbereich für axiale Lageunsicherheit des Sensors

Die optimale Position des Sensors befindet sich bei Scharfeinstellung auf 1,35m laut Abbildungsgleichung (9) in 12,68mm Abstand zur bildseitigen Hauptebene des Objektivs. Durch (18) ergibt sich dabei mit  $u'=45\mu\text{m}$  ein Toleranzbereich von  $\pm 49,97\mu\text{m}$ . Bei einer Einstellentfernung auf 2m liegt die ideale Position des Detektors in 12,72mm mit einer Toleranz von  $\pm 49,82\mu\text{m}$ . Da der Abstand der beiden optimalen Positionen mit  $40\mu\text{m}$  kleiner als der jeweils zulässige Toleranzbereich ist, ist damit eine genaue Scharfstellung nicht möglich.

Die tatsächliche Schärfelage des Systems soll deshalb durch die Messreihen des nächsten Kapitels bestimmt werden.

### 3.4 MTF

#### 3.4.1 Ziel

Die Modulationsübertragungsfunktion ist unter anderem abhängig von der Fokussierung. Da der CamCube wie in Kapitel 3.3 beschrieben auf eine feste Einstellung fokussiert ist, aber über den gesamten Eindeutigkeitsbereich korrekte Daten liefern soll, ist es von hohem Interesse, in einem möglichst großen Bereich eine gute Kontrastübertragung zu haben. Um diese zu überprüfen, soll mit dieser Messreihe die MTF in verschiedenen Distanzen bestimmt werden. Ebenso soll

dadurch, wie bereits in 3.3.4 erwähnt, die tatsächliche Schärfelage des Systems ermittelt werden, indem jeweils die Fläche unterhalb der MTF-Kurve berechnet wird. Je später eine MTF-Kurve abfällt, desto größer ist die Fläche unter der Kurve, und desto besser ist die MTF. Es ist davon auszugehen, dass es sich bei der Ebene mit der besten MTF um die Schärfeebene handelt. Bei den Messungen wird in dieser Arbeit zunächst nur die Bildmitte betrachtet, und zwar ein Bereich von 80 x 80 Pixeln. Diese Begrenzung wird gewählt, um die MTF zunächst möglichst frei von Randfehlern und Bildverzerrungen, die verstärkt am Bildrand auftreten, zu bestimmen.

### 3.4.2 Verwendete Objektive

Es werden drei verschiedene Objektive in Verbindung mit dem PMD[vision]<sup>®</sup>CamCube3.0 getestet:

|                   | Bezeichnung         | Brennweite | Blende    |
|-------------------|---------------------|------------|-----------|
| <b>Objektiv 1</b> | Skrobol PMD 25proto | 12,8 mm    | 1,1       |
| <b>Objektiv 2</b> | Skrobol PMD 25proto | 12,8 mm    | 1,4       |
| <b>Objektiv 3</b> | Kowa LM16HC         | 16,0 mm    | 1,4 (~16) |

Das Objektiv 3 von Kowa wurde ursprünglich mit dem CamCube1.0 verwendet. Dieses Objektiv ermöglicht verschiedene Blendeneinstellungen von 1,4 bis 16, sowie eine manuelle Fokussierung. Für die Tests in dieser Arbeit wird nur die größte Blendenöffnung von 1,4 verwendet, um eine bestmögliche Vergleichbarkeit zu den anderen beiden Objektiven zu schaffen.

Die beiden Skrobol-Objektive wurden später speziell für PMDTec angefertigt, sie sind bis auf die unterschiedliche Blendenöffnung baugleich. Zunächst wurde die Version mit Blendenzahl 1,4 für den CamCube2.0 entwickelt, für den CamCube3.0 wurde dann aufgrund des Wunsches nach mehr Lichtstärke das Objektiv mit Blendenzahl 1,1 benutzt. Die Skrobol-Objektive bieten keine Einstellmöglichkeiten für den Anwender.

### 3.4.3 Messverfahren

Als Methode für die Ermittlung der MTF wird die Slanted Edge - Methode (Schräge Kante) nach ISO 12233 gewählt. Die sogenannte "Edge-based Spatial

Frequency Response (E-SFR)“ ist die Antwort eines digitalen Detektors auf die Abtastung der Kante [10], sie liefert die Übertragungscharakteristik des Objektivs in Kombination mit der Pixelapertur. Es handelt sich bei den Ergebnissen der Messungen also um System-MTF-Kurven, die von Objektiv und Sensor abhängen. Es werden keine reinen Objektiv-MTF-Kurven gemessen. Da jedoch immer die gleiche Kamera verwendet wird, können die Kurven untereinander verglichen werden und somit relative Aussagen über die Objektive gemacht werden.

Kanten kommen in vielen natürlichen Szenen vor und werden bei der Beurteilung der Bildqualität oft als subjektiver Schärfeindikator benutzt, sind also auch visuell von großer Bedeutung. Allerdings ist dies auch der Grund, weshalb oft besonders die Kanten durch kamerainterne Bildverarbeitung betroffen sind und dadurch Ergebnisse der Slanted-Edge Messmethode verfälscht werden. Für diese Fälle wurde ein weiteres Testverfahren entwickelt, bei dem ein sinusoidaler Siemensstern (harmonischer Siemensstern) als Testchart verwendet wird. Da beim PMD CamCube allerdings keine interne Bildverarbeitung stattfindet, die sich auf die Kanten auswirkt, kann das Slanted-Edge Verfahren zur Bestimmung der MTF verwendet werden.

Ein großer Vorteil der Slanted-Edge Methode ist das simple Testchart [11], eine leicht schräge schwarz-weiß Kante. Die Verwendung dieser geeigneten Kante erlaubt es, den Kanten-Gradienten zu vielen Phasen relativ zu den einzelnen Photoelementen zu messen, so dass die MTF bei örtlichen Frequenzen höher als die halbe Abtastfrequenz (Grenzfrequenz des Systems - Nyquist) bestimmt werden kann [10] und Aliaseffekte vermieden werden [12]. Durch die Schräglage der Kante wird die örtliche Abhängigkeit der Abtastung von der Lage des Pixelrasters kompensiert [13].

Um die vertikale MTF zu messen, wird eine horizontal orientierte Kante benötigt, mit einer vertikal orientierten Kante wird die horizontale MTF ermittelt.

#### **3.4.4 Testchart / Aufbau**

Es wird ein Testchart mit einer ca. 5-10° schrägen schwarz-weiß Kante mit variabler Aufhängung angefertigt, sodass die Kante sowohl horizontal orientiert als auch vertikal orientiert aufgenommen werden kann. Dieses Testchart wird am vorderen Ende einer automatischen Messschiene angebracht, an welcher die



Kamera auf einem Träger befestigt wird (Abbildung 3-5). Diese Messschiene kann mit MATLAB angesteuert werden und erlaubt eine genaue Positionierung der Kamera in einem Bereich von 0 bis maximal 4,5 m zum Testchart. So können sehr einfach Messungen aus verschiedenen Distanzen vorgenommen werden.

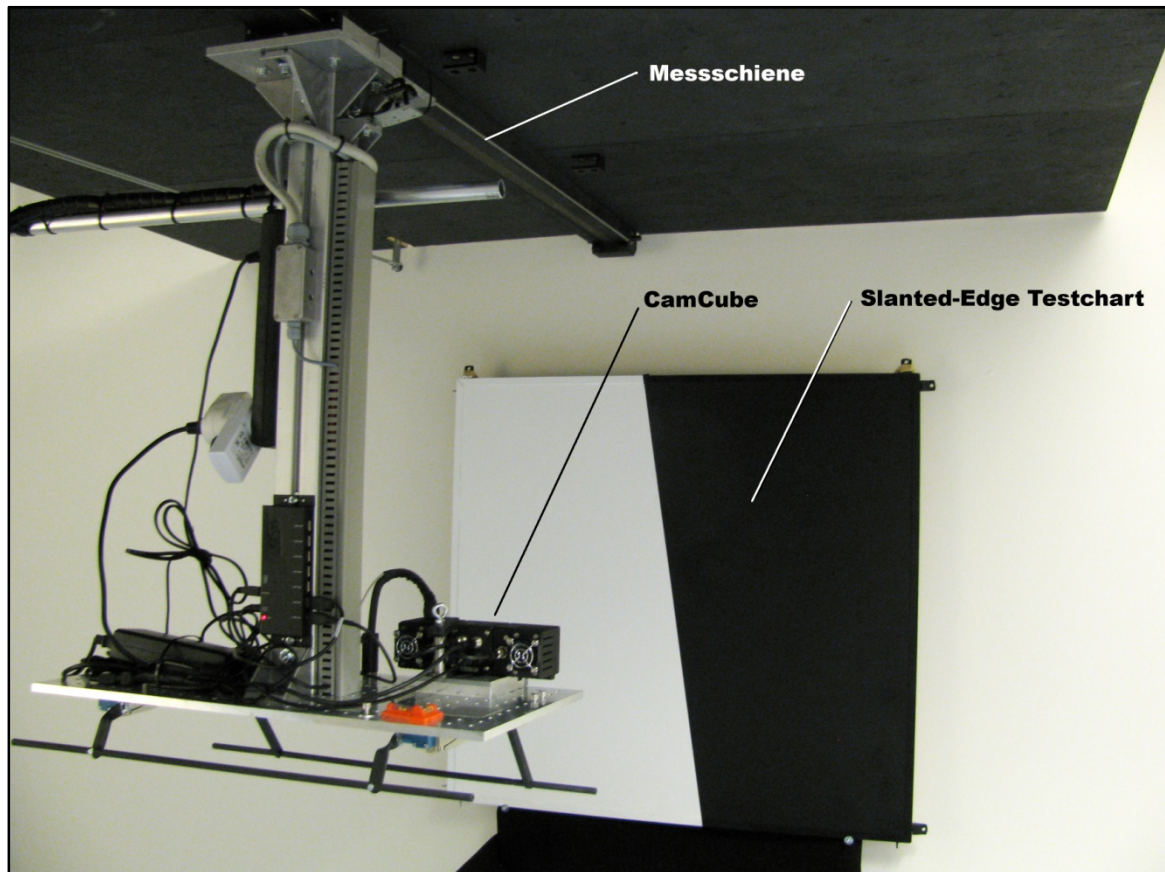


Abbildung 3-5 Messaufbau Slanted-Edge

### 3.4.5 Durchführung

#### 3.4.5.1 Linearitätstest

Als Vorbereitung für die Messung der MTF nach der Slanted Edge - Methode wird zunächst ein Linearitätstest durchgeführt, da bei nicht linearen Daten vor der Auswertung der Kantenbilder eine Linearisierung durchgeführt werden müsste.

Dieser Test ergibt, dass die Kamera bis zu einer bestimmten Integrationszeit ausreichend lineare Daten liefert. Abbildung 3-6 zeigt als Beispiel die Linearitätsmessung aus 2m Entfernung, hier ist bis zu einer Integrationszeit von 2000 $\mu$ s ausreichend lineares Verhalten gegeben, bei längeren Zeiten wird eine Sättigung



der Pixel erreicht. Eine Linearisierung der Kameradaten ist also nicht nötig, es muss allerdings in den folgenden Tests darauf geachtet werden, die Integrationszeit so zu wählen, dass die Pixeldaten im linearen Bereich gehalten werden.

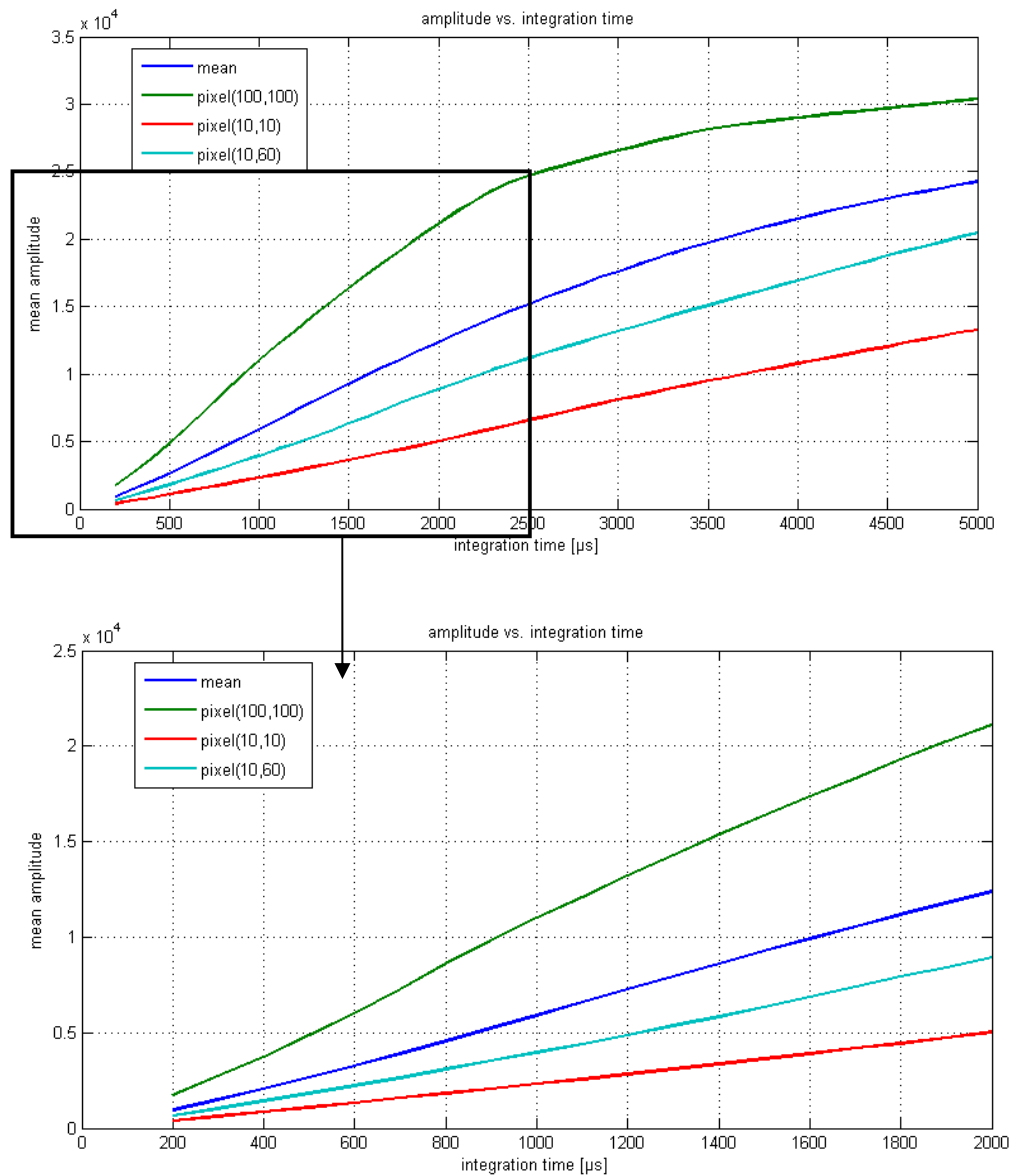


Abbildung 3-6 Linearitätstest

### 3.4.5.2 Korrektur der Integrationszeit und Shading-Korrektur

Das Testchart soll aus den Entfernungen 1m bis 4,50m in Abständen von 0,1m aufgenommen werden. Vorher muss jedoch aus jeder Entfernung eine Aufnahme von der Wand ohne Testchart gemacht werden, um Korrekturwerte für Belichtung

(Integrationszeit  $T_{int}$ ) und eine Shading-Korrektur (Vignettierungskorrektur) zu ermitteln. Diese Korrekturwerte werden benötigt, um die Aufnahmen bzw. die MTF-Auswertung vergleichbar zu machen. Für die Ermittlung der Korrekturmatrix werden die Amplitudenbilder verwendet.

Für die adaptive Anpassung der Integrationszeit wird zu Beginn eine Soll-Amplitude festgelegt, um eine gleiche Belichtung aller Aufnahmen zu erreichen. Zunächst wird die IST-Amplitude innerhalb einer vordefinierten ROI in der Bildmitte bestimmt, wobei zur Verminderung von Fehlern durch Rauschen über 100 Frames gemittelt wird. Die Amplitude und entsprechende Integrationszeit  $T_{int}$  wird daraufhin iterativ an die Soll-Amplitude mit einer Toleranz von  $\pm 5\%$  angepasst.

Außerdem muss die Shading-Korrektur durchgeführt werden, um eine gleichmäßige Helligkeit innerhalb des Bildes zu erreichen. Die Vignettierung tritt einerseits aufgrund des Weglängenunterschieds zum Rand gegenüber der Bildmitte und andererseits aufgrund der Abstrahlcharakteristik der aktiven Kamerabeleuchtung und Lichtverlusten im Objektiv auf. Abbildung 3-7 zeigt ein unkorrigiertes und ein korrigiertes Amplitudenbild. Für die Shading-Korrektur wird, um Fehler durch Rauschen zu mindern, ebenfalls über 100 Frames gemittelt. Die berechneten Korrekturfaktoren werden in einer LUT<sup>3</sup> gespeichert.

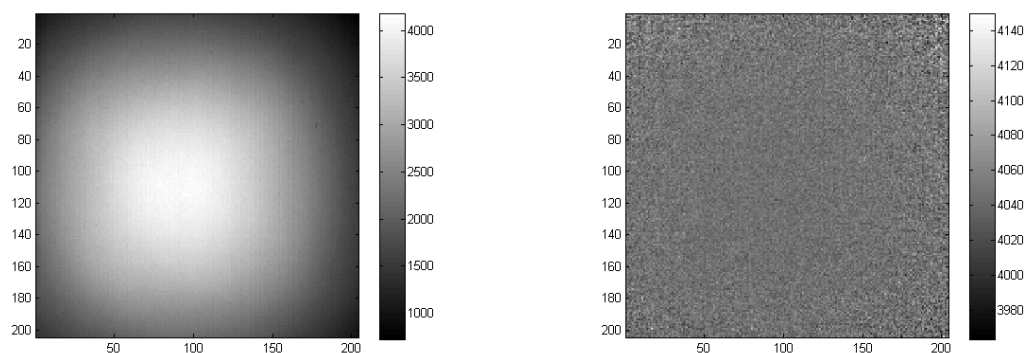


Abbildung 3-7 Amplitudenbild ohne (links) und mit Shading-Korrektur (rechts)

<sup>3</sup> LUT = Look-Up-Tabelle, Eine LUT ist eine Tabelle, in der Ergebnisse einer aufwändigen Berechnung gespeichert sind.

### 3.4.5.3 Aufnahme mit Testchart

Bei der eigentlichen Messung, also der Aufnahme der Kantenbilder (Programmteil SlantedEdgeTest\_Part2) werden jeweils die Anpassung der  $T_{int}$  und die entsprechende LUT geladen. Mit diesen Einstellungen werden wiederum über 100 Frames gemittelte Amplitudenbilder des Slanted-Edge-Testcharts aufgenommen und abgespeichert, die LUT wird dabei multiplikativ angewendet. Dies wird für alle Aufnahmeentfernungen durchgeführt. Abbildung 3-8 zeigt einen schematischen Programmablaufplan für die Aufnahme aus einer einzelnen Entfernung.

### 3.4.6 Auswertung

Die Auswertung der Aufnahmen geschieht mit einer auf MATLAB basierten Software, dem Tool sfrmat 2.0 von Peter Burns [14]. Diese Software ermittelt automatisch die MTF, nachdem eine rechteckige ROI-Auswahl<sup>4</sup> durch den Benutzer erfolgt ist.

#### 3.4.6.1 Algorithmus

Nach der Festlegung der ROI wird hierbei zunächst für jede senkrecht zur Kante liegende Pixellinie die diskrete Ableitung berechnet, wodurch sich jeweils die LSF (Line Spread Function) ergibt. Dann wird der Schwerpunkt jeder Linie bestimmt, um eine Gerade durch die verschiedenen Schwerpunkte legen zu können. So wird die Position und Richtung der Kante im Bild bestimmt. Danach werden die Kantenschnitte in vier Bereiche einsortiert, in denen der Schwerpunkt der Kante jeweils um 0,25 Pixel, 0,5 Pixel, 0,75 Pixel und 1 Pixel verschoben sind, und für jeden dieser vier Bereiche ein mittleres Kantenbild berechnet [13]. Durch dieses Zusammenfassen (Binning) wird eine vom Pixelraster unabhängige, 4-fach überabgetastete LSF erzeugt. Um Fehler durch Rauschen zu vermeiden, wird weiterhin ein Filter (Hamming-Fenster) angewendet, welcher die Funktion glättet. Von dieser geglätteten Funktion wird nun die Diskrete Fouriertransformation berechnet, deren normalisierter Betrag die MTF ergibt. Die MTF wird für die Ortsfrequenz 0 auf 1 normiert.

---

<sup>4</sup> ROI = Region of Interest

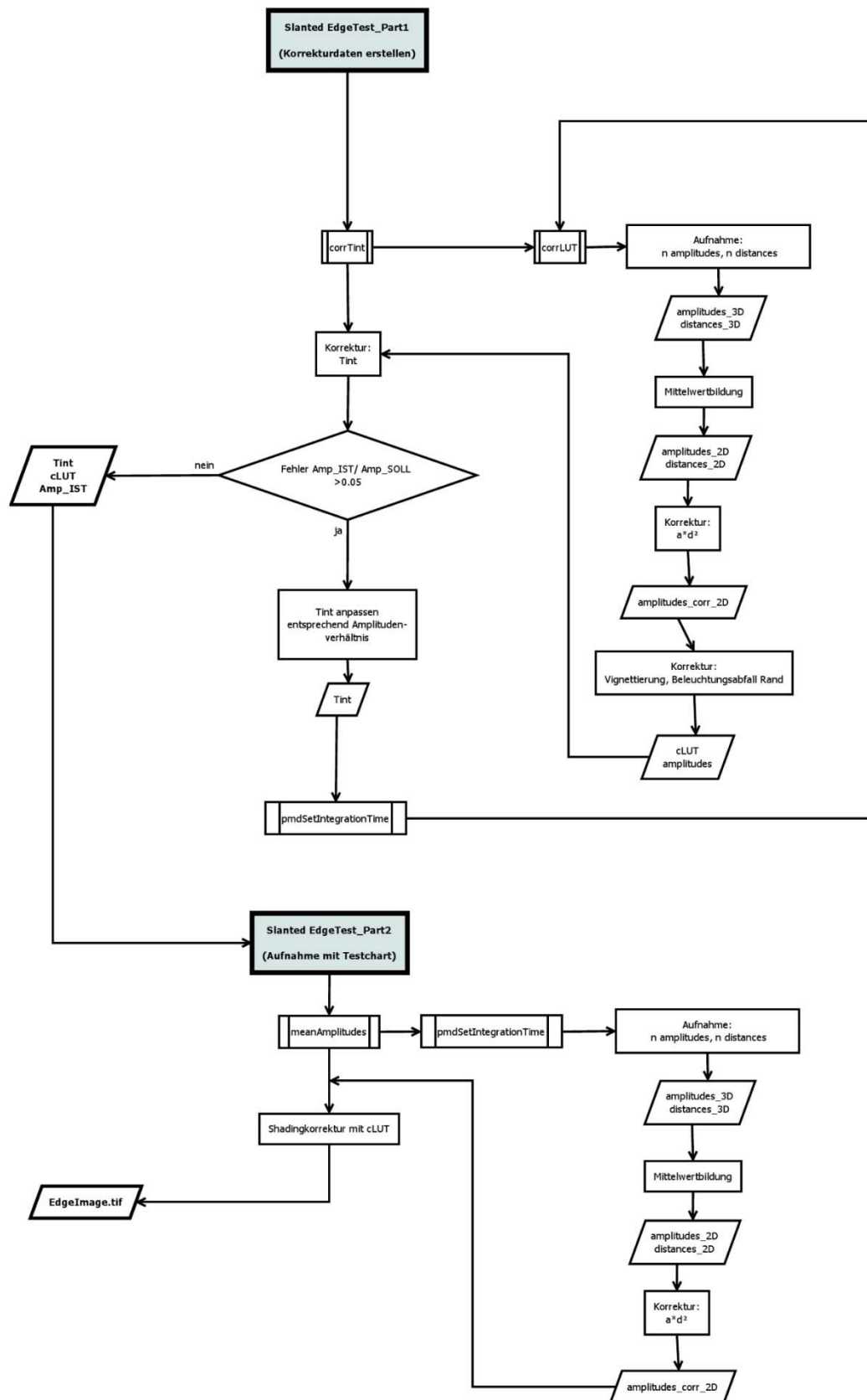


Abbildung 3-8 Programmablauf Slanted-Edge Test

### 3.4.6.2 Ergebnisse

Abbildung 3-9 zeigt alle an der vertikalen schrägen Kante ermittelten MTF-Kurven, also die horizontalen MTF von Objektiv 1 aus den unterschiedlichen Distanzen. Auf der x-Achse ist die Ortsfrequenz aufgetragen, die gestrichelte Linie zeigt die Nyquistfrequenz des Sensors an, die bei 0,5 Linienpaaren pro Pixel bzw. 11,11 Linienpaaren pro mm liegt. Durch den Algorithmus der Auswertungssoftware (vergl. 3.4.6.1) werden auch MTF-Werte für höhere Ortsfrequenzen dargestellt, diese zeigen jedoch nur das Aliaspotential an, da feinere Details als  $0,5 \frac{lp}{px}$  nicht mehr aufgelöst werden können.

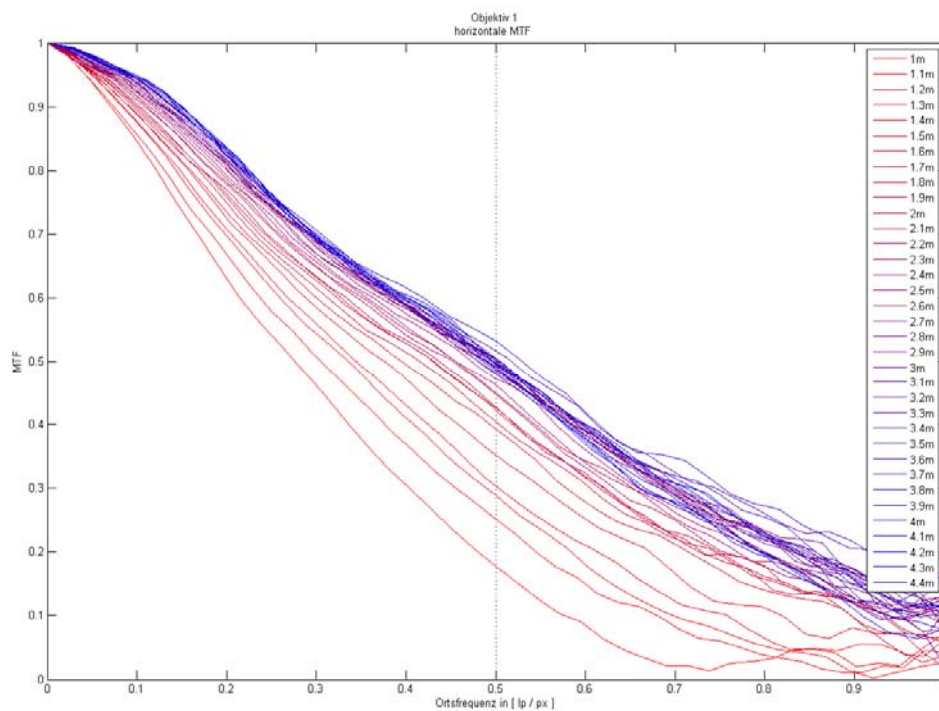


Abbildung 3-9 Objektiv 1, horizontale MTF, alle Entfernungen

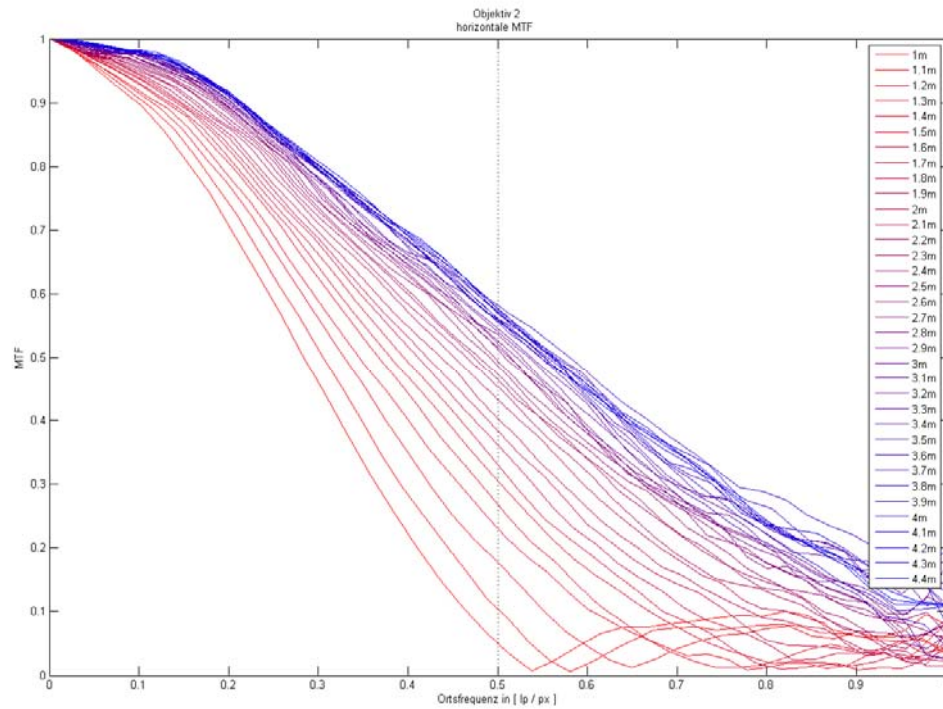


Abbildung 3-10 Objektiv 2, horizontale MTF, alle Entfernungen

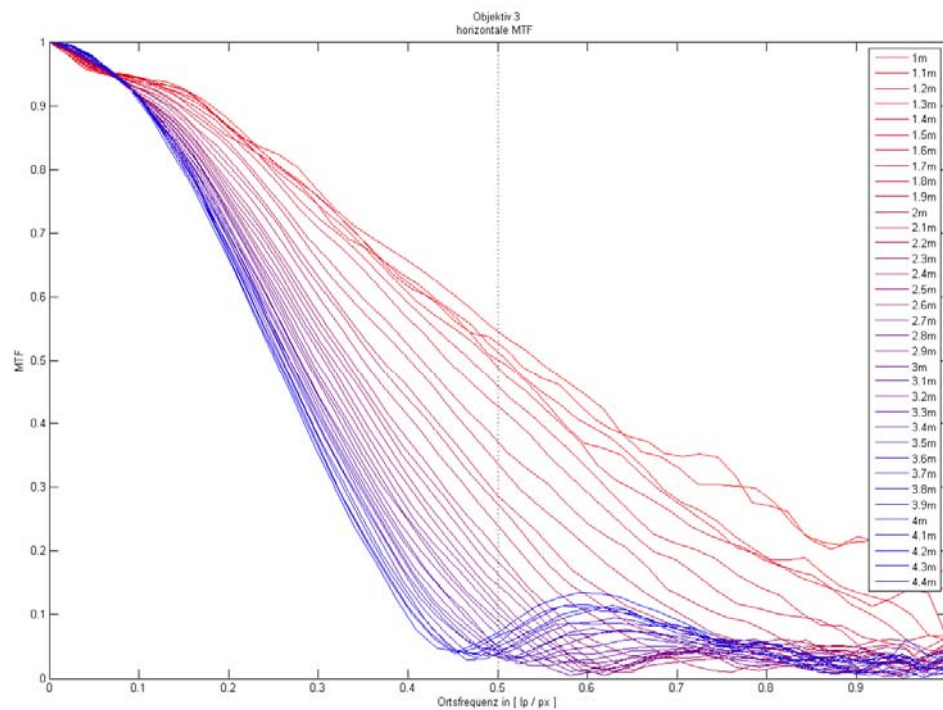


Abbildung 3-11 Objektiv 3, horizontale MTF, alle Entfernungen

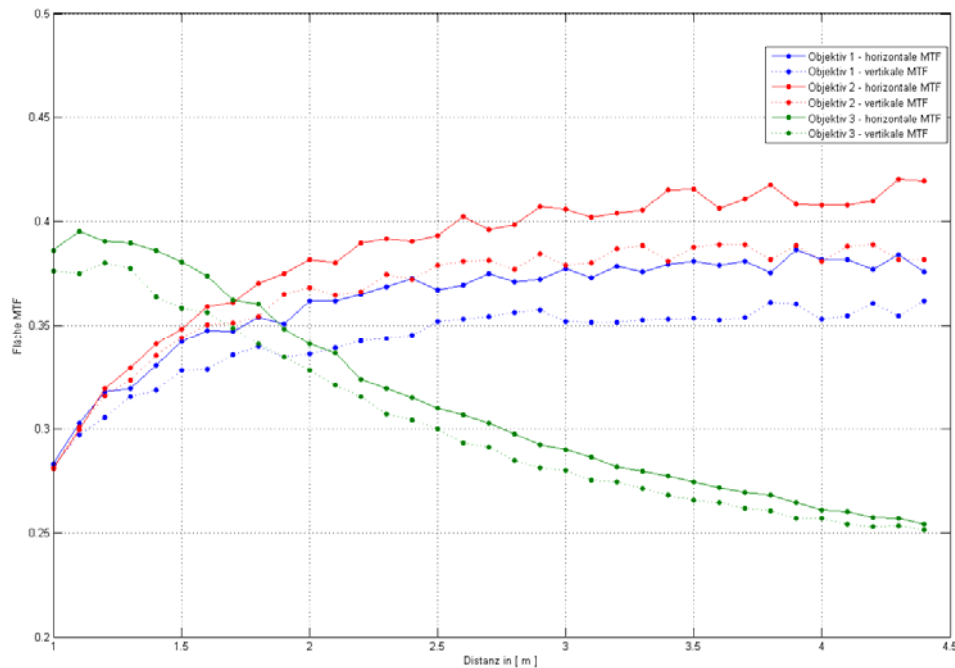


Abbildung 3-12 Fläche MTF bis Nyquistfrequenz

Die gemessenen MTF-Kurven fallen recht steil nach rechts ab. Deutlich zu erkennen ist aber, dass die Kurven der größeren Entfernungen (Blau) weniger stark abfallen als die der nahen Distanzen (Rot). Bei der Grenzfrequenz liegt die 4,4m - MTF bei ungefähr 0,5, die 1m - MTF aber nur bei ca. 0,2. Vergleicht man alle drei Objektive miteinander (Abbildung 3-9 bis Abbildung 3-11)<sup>5</sup>, fällt auf, dass die Kurven von Objektiv 1 und 2 ähnlich sind, sie sind bei beiden Objektiven im Nahbereich steiler als im Fernbereich. Insgesamt gehen die Kurven von Objektiv 2 weiter auseinander, im Nahbereich sind die Werte niedriger, im Fernbereich höher als bei Objektiv 1. Objektiv 3 dagegen verhält sich entgegengesetzt zu den anderen beiden Objektiven, hier fallen die Kurven größerer Entfernungen deutlich stärker ab als diejenigen Kurven kurzer Distanzen.

<sup>5</sup> Die Abbildungen der vertikalen MTF-Kurven befinden sich im Anhang.

Objektiv 3 scheint demnach eine andere Schärfelage als die beiden anderen Objektive zu besitzen. Bei den Skrobol-Objektiven scheint diese nicht im Nah-, sondern im Fernbereich zu liegen. Um diese Aussage zu verdeutlichen, wird in Abbildung 3-12 der jeweilige Flächeninhalt unter den horizontalen und vertikalen MTF Kurven bis zur Nyquistfrequenz dargestellt. Hier ist deutlich zu erkennen, dass Objektiv 3 im Gegensatz zu den beiden anderen Objektiven im Nahbereich von 1m bis ca. 1,7m besser ist, dann allerdings deutlich unter die beiden anderen Objektive abfällt.

Obwohl alle Objektive mithilfe des 1,35m entfernten Gittermusters scharfgestellt wurden, scheint diese Entfernung nur bei dem Kowa-Objektiv auch tatsächlich der Schärfelage zu entsprechen. Da dieses Objektiv über einen Schärferring verfügt, kann hier die Schärfe nach dem Festschrauben des Objektivs am Gehäuse eingestellt werden. Dies lässt demnach eine wesentlich genauere Einstellung zu, als die Einstellung der Skrobol-Objektive, bei denen durch das Festschrauben des Objektivs inklusive Gewinde nach der Scharfstellung diese leicht wieder verstellt wird.

Wird das Kowa-Objektiv auf einer Entfernung von 4m scharf gestellt, ändern sich MTF-Kurven dementsprechend und ähneln denen der Skrobol-Objektive. Insgesamt liegen dabei die Flächen-Werte allerdings weit unter denen von Objektiv 1 und 2 (vergl. Abbildung 3-13, die Pfeile symbolisieren die jeweilige Scharfeinstellung).

Für Anwendungen im Nahbereich von 1m bis ca. 1,7m eignet sich also scheinbar das Kowa-Objektiv besser, für alle anderen Anwendungen sollte auf die Skrobol-Objektive zurückgegriffen werden. Bei diesen weist das Objektiv mit Blendenzahl 1,4 gegenüber demjenigen mit Blendenzahl 1,1 etwas bessere MTF Werte auf, was sich physikalisch bedingt durch die kleinere Öffnung zu erklären ist. Je größer die Öffnung, desto mehr Linsenfehler beeinflussen die optische Abbildung. Es muss also in diesen Fällen zwischen besserer Lichtstärke oder besserer Modulationsübertragung abgewogen werden. Sollen beispielsweise bewegte Objekte vermessen werden, sind möglichst kurze Integrationszeiten nötig, damit durch die für den 4-Phasen-Algorithmus benötigten vier nacheinander aufgenommenen



Frames möglichst keine Bewegungsartefakte entstehen. In diesem Fall sollte dann eher auf das lichtstärkere Objektiv zurückgegriffen werden.

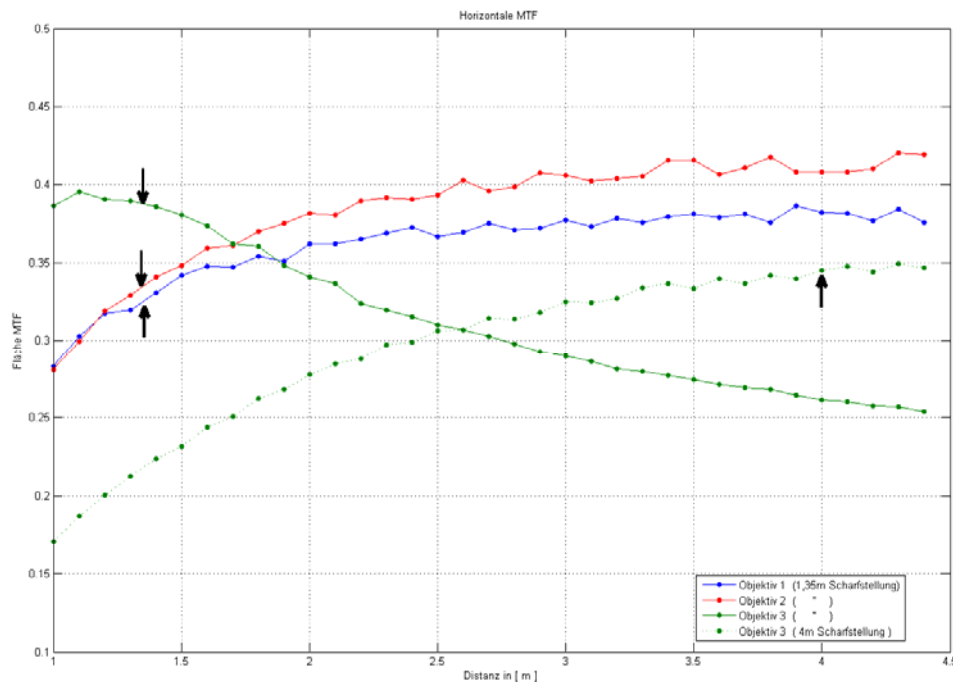


Abbildung 3-13 Horizontale MTF, inkl. Objektiv3 - Scharfstellung auf 4m

In Abbildung 3-12 ist außerdem der Unterschied zwischen horizontaler und vertikaler MTF zu erkennen. Die horizontale MTF ist bei allen Objektiven der Fläche nach jeweils insgesamt besser als die vertikale MTF. Dieser Unterschied ist mit der Pixelstruktur des PMD-Sensors zu erklären. In vertikaler Richtung ist der Füll-Faktor<sup>6</sup> höher, als in horizontaler Richtung (vergl. 3.2). Dadurch kann die nahezu vertikale Kante vom Sensor besser aufgelöst werden. Da die horizontale MTF also an dieser höher abgetasteten Kante gemessen wird, ist sie jeweils besser als die an der nahezu horizontalen Kante gemessene vertikale MTF.

Allgemein steht eine flache MTF-Kurve auf hohem Niveau für eine gute Kantenschärfe, da eine Kante im Bild einer Überlagerung aller Frequenzen entspricht. Eine von hohen Werten bei niedrigen Ortsfrequenzen schnell abfallende Kurve

<sup>6</sup> Der Füll-Faktor gibt den Anteil der lichtempfindlichen Pixelfläche an.

dagegen steht für ein Bild mit schlechter Kantenschärfe. Alle gemessenen MTF-Kurven weisen daher auf eine nicht sehr gute Kantenschärfe hin.

### 3.5 Vergleich mit MTF – Kurven des Herstellers

#### 3.5.1 Ziel

Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei den ermittelten MTF-Kurven um Systemkurven, die nicht nur von den Objekteigenschaften sondern auch von den Eigenschaften der Kamera abhängen. Hierbei spielen zum Beispiel Anzahl und Größe der Pixel, die spektrale Empfindlichkeit, Algorithmen bei der Datenauslese und weitere Faktoren eine Rolle [15]. Es soll geprüft werden, ob sich trotzdem die gemessenen System-MTF-Kurven in den Kurven der rein optischen Kurven des Herstellers wiederfinden.

#### 3.5.2 Probleme

Vom Hersteller werden in der Regel sehr viele verschiedene MTF-Kurven geliefert, die einen Vergleich mit den gemessenen Kurven erschweren. Bei den vorliegenden Hersteller-MTFs ist außerdem unklar, ob es sich um per Objektiv-Design-Software gerechnete oder tatsächlich gemessene Kurven handelt. Höchstwahrscheinlich beziehen sich die Kurven auf eine im unendlichen liegende Einstellentfernung womit eine Vergleichbarkeit mit den im Verlauf dieser Arbeit gemessenen Kurven im Prinzip fragwürdig ist. Da jedoch nur diese Herstellerkurven vorliegen und aufgrund dieser Kurven auch die Objektivauswahl vorgenommen wurde, soll trotzdem ein Vergleich durchgeführt werden.

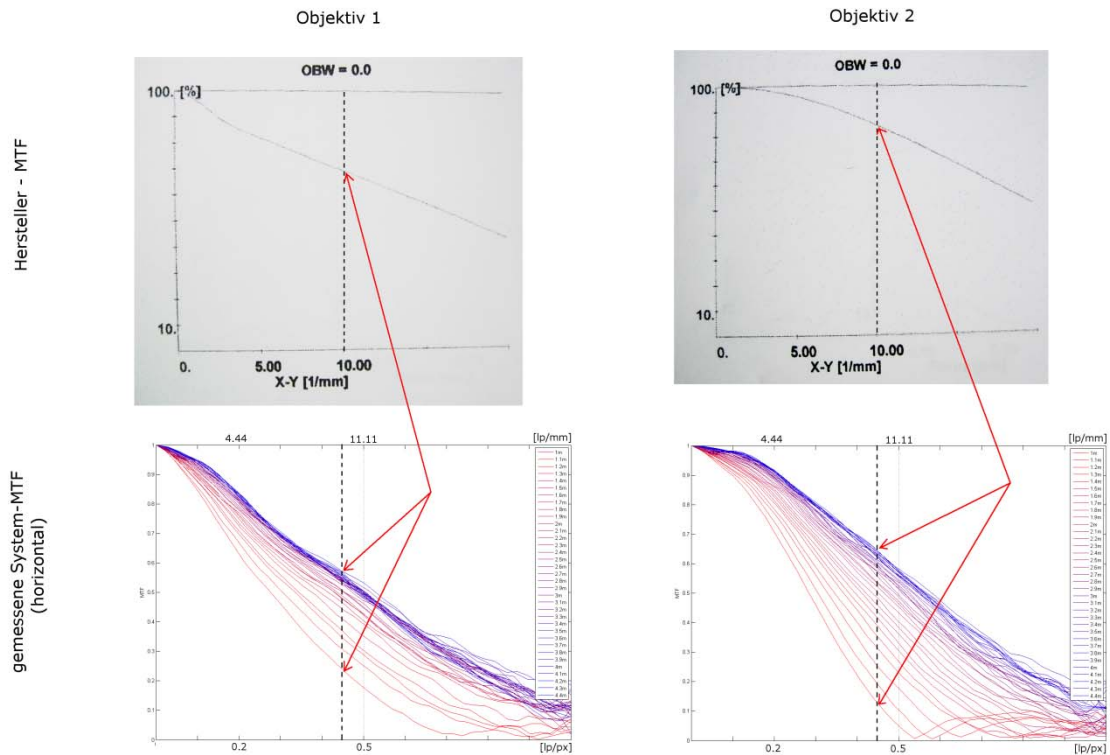


Abbildung 3-14 Vergleich Objektiv-MTF mit System-MTF

### 3.5.3 Vergleich

Es liegen lediglich MTF-Kurven von den beiden Skrobo-Objektiven vor. Hierbei wird jeweils die Kurve der Bildmitte betrachtet. Abbildung 3-14 zeigt diese Kurven im Vergleich zu den jeweiligen System-MTF. Auffällig ist, dass die Objektiv-Kurven wesentlich langsamer abfallen als die gemessenen Systemkurven. Dies verdeutlicht, dass der Sensor in diesem System das auflösungsbegrenzende Element ist und nicht das Objektiv.

Insgesamt liegen die optischen MTF-Werte des Objektivs 1 etwas unter denen von Objektiv 2, was bei der System - Messung auch der Fall ist. Betrachtet man die Form der optischen Kurven, so stellt man fest, dass diejenige des Objektivs 1 eher nach unten gebogen, die des Objektivs 2 im Gegensatz dazu nach oben gebogen ist. Nicht ganz so deutlich aber näherungsweise ist dieses Verhalten auch in den Systemkurven zu erkennen.

### 3.5.4 Fazit

Die absoluten Werte der optischen Kurven finden sich nicht genauso in den Systemkurven wieder, allerdings gibt es Ähnlichkeiten in den Kurvenverläufen und im

Verhältnis zwischen unterschiedlichen Objektiven. Dementsprechend können also MTF-Kurven aus optischen Messungen einen Anhaltspunkt für die Objektivauswahl darstellen. Allerdings müssen die Kurven sorgfältig auf ihre Bezugsgrößen geprüft werden, da die MTF, wie in Kapitel 2.3.4 beschrieben, von vielen Faktoren abhängt und nicht von jedem Hersteller in gleicher Form angegeben wird.

## 3.6 Phasenfehler Simulation

### 3.6.1 Ziel

Das Messverfahren der MTF und dessen Ergebnisse beziehen sich lediglich auf zweidimensionale Grauwertbilder. Was aber bedeutet eine bestimmte MTF für die Distanz-Daten? Wie groß ist der maximale Phasenfehler, der durch eine nicht perfekte Kontrastübertragung entsteht? Da bei der PMD – Technologie fast ausschließlich die Distanzen von Interesse sind, muss der Zusammenhang der Ergebnisse der MTF-Analyse für diese 3D-Daten ermittelt werden. Die Simulation wird in MATLAB umgesetzt.

### 3.6.2 Simulation

Wie in 2.2.3 und 2.2.4 beschrieben, werden die 3D-Daten aus der Korrelationsfunktion der optischen Modulation mit der Chipmodulation berechnet, wobei die Distanzen der Phase  $\varphi$  und die Grauwerte den Amplituden entsprechen.

Im Idealfall empfängt ein Pixel von lediglich einem Objektpunkt das reflektierte modulierte Licht. Die 4-Phasen-Messung ergibt 4 Stützstellen, aus denen die KF bestimmt und die Phase  $\varphi_{\text{ZIEL}}$  ( $=\text{Phi}[1]$  in Abbildung 3-15) berechnet werden kann, ein Beispiel zeigt Abbildung 3-15 (blaue Kurve[1]). Wenn ein Pixel nun nicht wie im Idealfall moduliertes Licht von lediglich einem Objektpunkt empfängt, sondern zusätzlich ein überlagertes Signal von den Nachbarpunkten, wirkt sich dies auf die Berechnung der KF und damit der Phase aus.

In der Simulation sollen vereinfacht zwei Nachbarpixel betrachtet werden, das Zielpixel und ein Störpixel (äquivalent zu Zielpunkt und Störpunkt in der Szene).

Basierend auf Gleichung (17) werden zunächst die Amplituden der KF des Zielpixels und des Störpixels entsprechend des Intensitätsverhältnisses  $I_v$  mit den Faktoren  $C_1$  und  $C_2$  berechnet:

$$C_1 = 1 + MTF \quad (19)$$

$$C_2 = I_v \cdot (1 + MTF) \quad (20)$$

Dadurch entstehen skalierte KFs von Ziel- und Störpixel (Beispiel Abbildung 3-15, grüne und rote Kurve) abhängig von der MTF und des Intensitätsverhältnisses zwischen Ziel- und Störpunkt.

Zur Überlagerung von Ziel- und Störsignal werden die Stützstellen der beiden skalierten KFs addiert. Aus diesen Stützstellen (hellblau [4] Pfeile) wird dann die Phase  $\varphi_{\text{ZIEL\_GESTÖRT}} (= \text{Phi}[4])$  berechnet. Die Differenz zwischen  $\varphi_{\text{ZIEL\_GESTÖRT}}$  und  $\varphi_{\text{ZIEL}}$  ergibt den durch die MTF entstandenen Phasenfehler. Abbildung 3-16 verdeutlicht nochmals den Zusammenhang der Simulation.

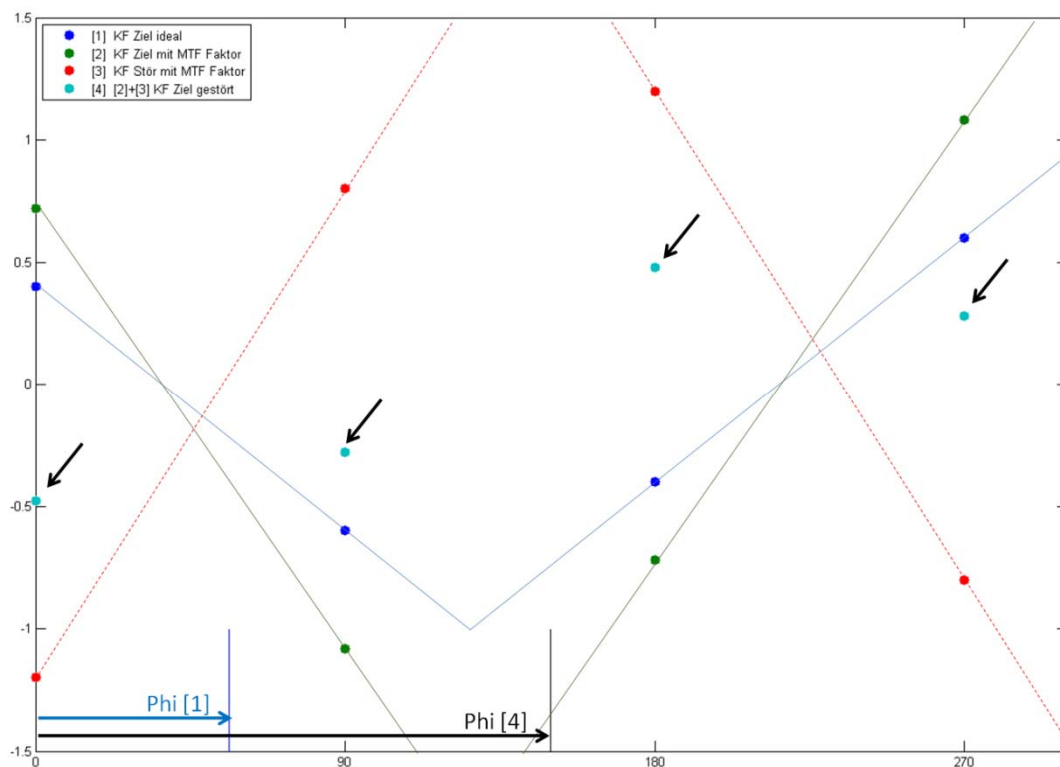


Abbildung 3-15 Idee der Phasenfehler Simulation

Um diesen Phasenfehler für verschiedene Intensitätsverhältnisse und MTF-Werte bei unterschiedlichen Ziel- und Stördistanzen zu berechnen, wird die Simulation abhängig von diesen vier Variablen berechnet.

Die Berechnung wird für 50 verschiedene Intensitätsverhältnisse zwischen 1:1000 und 1000:1 durchgeführt, bei MTF-Werten von 0,5 bis 1 in Schritten von 0,01. Ziel- und Störentfernung werden beide über den gesamten Eindeutigkeitsbereich von 0 bis  $2\pi$  in Schritten von  $0,01\pi$  simuliert.

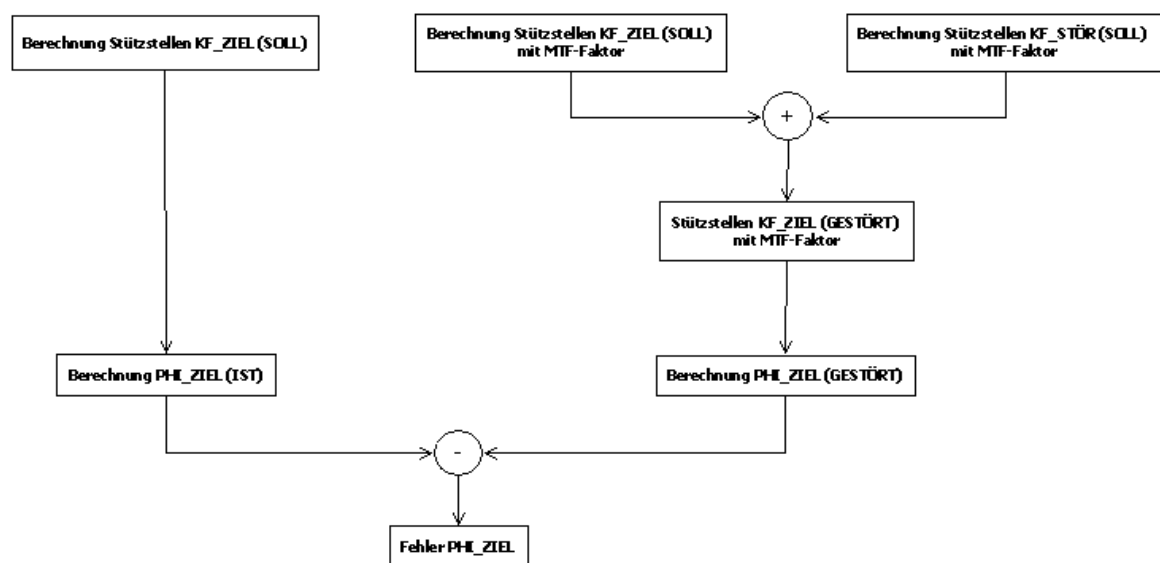


Abbildung 3-16 Ablauf Phasenfehler Simulation

### 3.6.3 Ergebnisse

Die erste Erwartung an die Ergebnisse der Simulation ist, dass bei gleicher Entfernung, also gleicher Phase des Ziels und des Störers unabhängig vom Übertragungsfaktor und auch unabhängig vom Intensitätsverhältnis der Phasenfehler immer gleich null ist. Da bei Überlagerung zweier Funktionen mit gleicher Phase lediglich die Amplitude verändert wird, sollte hier kein Phasenfehler entstehen.

Die Auswertung zeigt, dass diese Erwartung zutrifft. In Abbildung 3-17 sind auf der x-Achse alle Kombinationen von MTF und Intensitätsverhältnis aufgetragen,

die y-Achse stellt die Entfernung von Ziel und Störer (Ziel = Störer) da, der Phasenfehler ist farbig codiert. Hier ist zu sehen, dass sich kein Fehler ergibt.

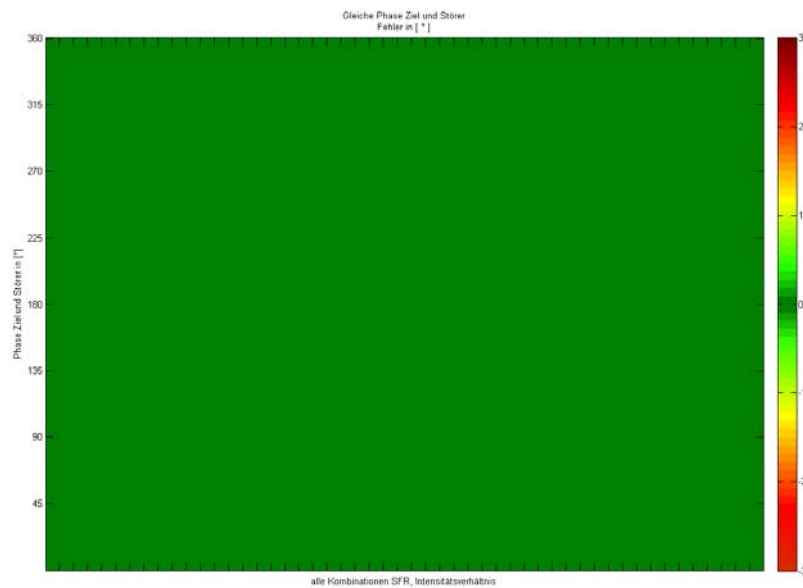


Abbildung 3-17 Phasenfehler-Simulation, gleiche Phase Ziel und Störer

Die zweite Erwartung ist, dass bei einer perfekten Kontrastübertragung ( $MTF=1$ ) der Phasenfehler ebenfalls immer gleich null ist. Dies ist der Fall, wie die folgende Grafik (Abbildung 3-18) und auch Abbildung 3-20 zeigt:

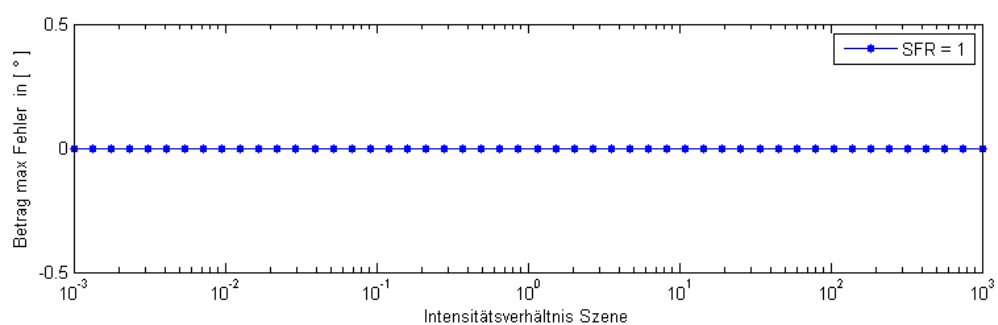


Abbildung 3-18 Phasenfehler-Simulation,  $MTF=1$

Bei einer  $MTF$  von 1 ist der maximale Phasenfehler unabhängig vom Intensitätsverhältnis in der Szene und unabhängig von den Phasen von Ziel und Störer immer gleich 0.



Die wesentliche Fragestellung dieser Simulation ist jedoch die nach dem maximalen Fehler. Wie groß ist dieser und bei welchen Kombinationen tritt er auf? Bei welchen MTF-Werten ist der Fehler noch akzeptabel? Daraus abgeleitet ergibt sich die Frage nach der Anforderung an ein Objektiv.

Abbildung 3-19 und Abbildung 3-20 stellen den Betrag des maximalen Phasenfehlers abhängig von MTF und Intensitätsverhältnis dar. Zu erkennen ist, dass dieser Fehler bis zu 180° Grad beträgt. Er liegt somit in einer enormen Größenordnung von der Hälfte des Eindeutigkeitsbereichs. Bis zu welcher Größe der Fehler noch akzeptabel ist, hängt natürlich von der jeweiligen Anwendung ab, allerdings sollte er selbstverständlich so klein wie möglich gehalten werden.

Bereits ab einer sehr guten MTF von 0,99 tritt der Maximale Phasenfehler von 180° auf, allerdings erst ab einem Intensitätsverhältnis von ca.  $10^{2,4}$  (ca. 250:1), welches in der Praxis vermutlich nicht sehr häufig auftritt. Ein Beispiel für ein realistisches Intensitätsverhältnis zeigt das Praxisbeispiel in Kapitel 3.6.4.

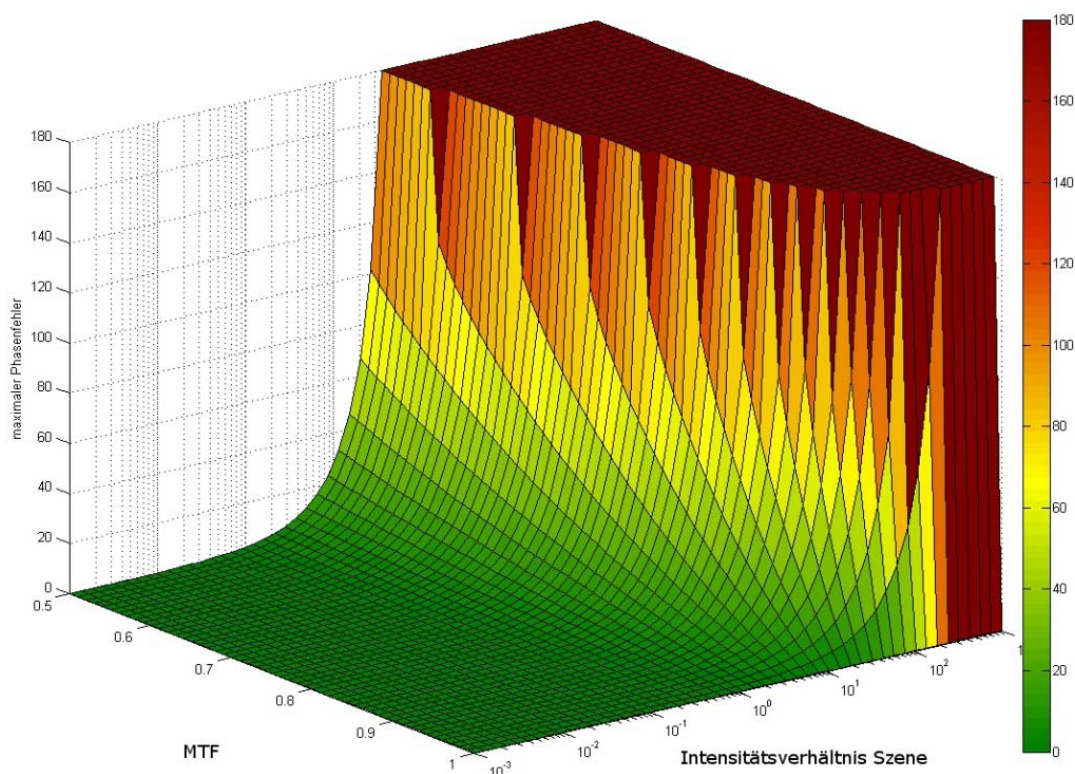


Abbildung 3-19 Phasenfehler-Simulation, maximaler Fehler



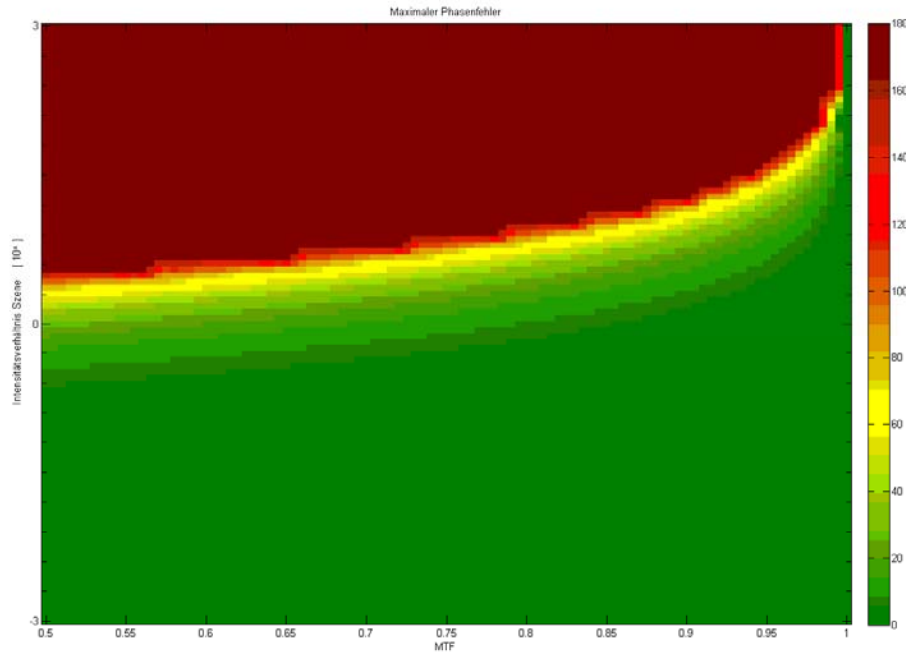


Abbildung 3-20 Phasenfehler-Simulation, maximaler Fehler

Die Abbildung 3-21 und Abbildung 3-22 stellen den maximalen Phasenfehler eines Intensitätsverhältnisses  $X$  und einer MTF von  $Y$  in Abhängigkeit von Ziel- und Stördistanz anhand von zwei Beispiel-Kombinationen dar. Der Betrag des Phasenfehlers ist farbig kodiert, zu beachten ist hierbei die unterschiedliche Skalierung der Farbskala. Auffällig ist die sehr verschiedene Verteilung des maximalen Fehlers. So ist beispielsweise bei der Kombination in Abbildung 3-21 der Fehler maximal bei einem Phasenunterschied von  $180^\circ$  zwischen Ziel- und Stördistanz, bei der Kombination aus Abbildung 3-22 hingegen ist bei dieser Differenz der Fehler am geringsten.

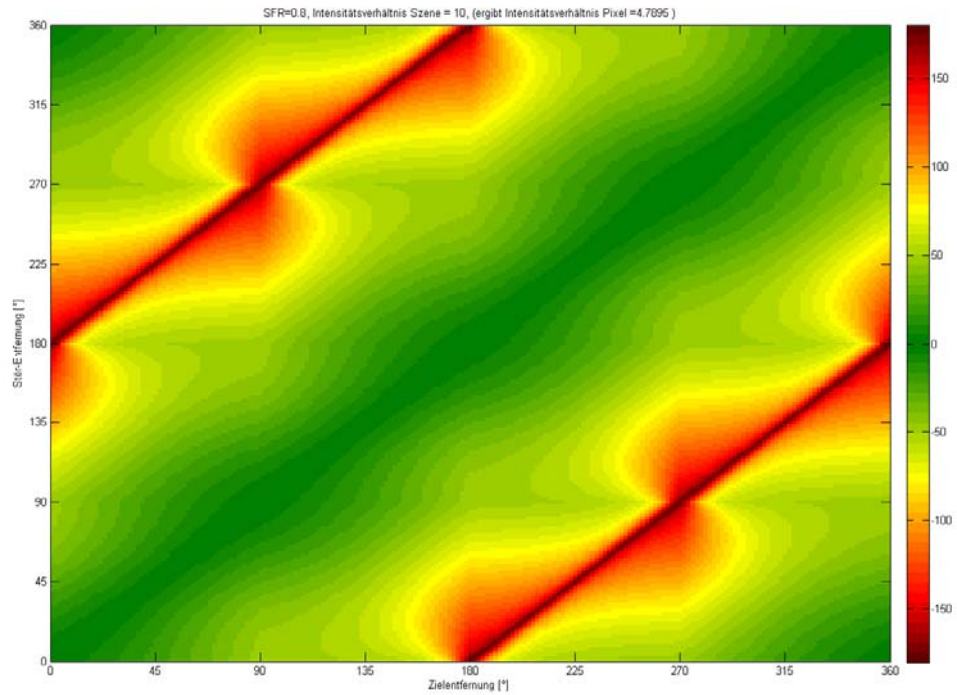


Abbildung 3-21 Maximaler Fehler (MTF=0.8, Intensitätsverhältnis 10:1)

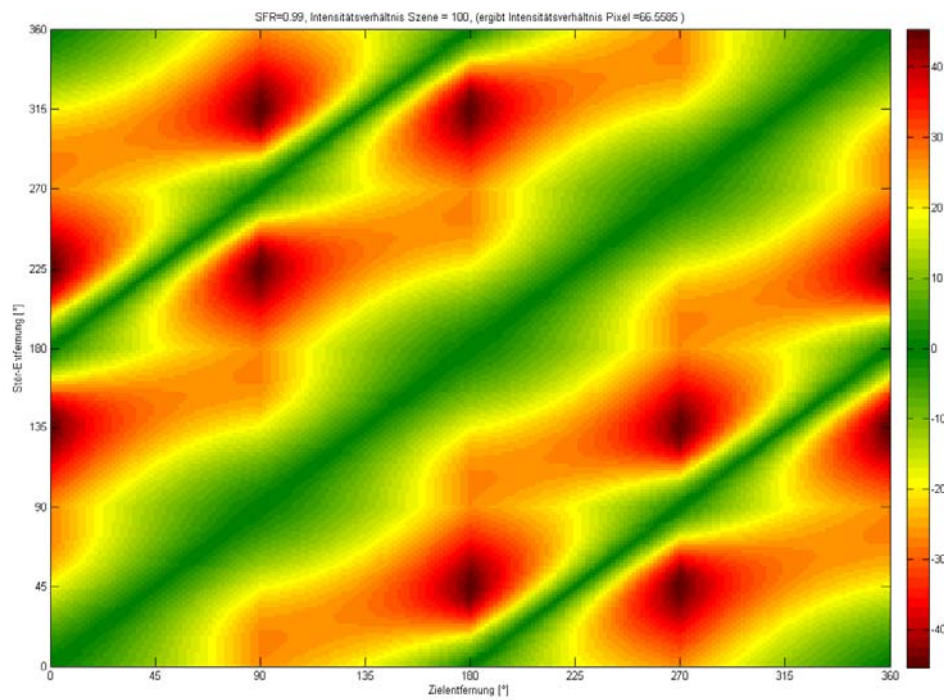


Abbildung 3-22 Maximaler Fehler (MTF=0.99, Intensitätsverhältnis 100:1)

### 3.6.4 Anwendungsbeispiel für die Praxis

Was aber bedeuten nun die Ergebnisse der Simulation für die Praxis? Wie können die Berechnungen für anwendungsnahe Fragestellungen genutzt werden?

Oft ist eine Szene mit einem Intensitätsverhältnis von  $X$  gegeben und eine Genauigkeit in der Messung mit einem maximalen Fehler von  $Y$  gefordert. Aus der Simulation des zu erwartenden Phasenfehlers kann dann entsprechend abgelesen werden, welcher MTF-Wert benötigt wird, um den geforderten maximalen Fehler nicht zu überschreiten.

Ein typisches Anwendungsgebiet für die ToF-Technologie ist die Gestensteuerung. Hierbei stellt sich oft die Frage, ob und vor allem wie genau die Messung der Hand möglich ist. Folgendes Beispiel stellt eine solche Situation nach.

Es soll eine Hand in 2,5m Entfernung vor einem 5m entfernten Hintergrund aufgenommen werden. Ein Finger und eine Lücke stellen zusammen ein Linienpaar dar. Angenommen, die Finger der Hand sind, ebenso wie die Lücken zwischen den Fingern, ca. 2cm breit, dann ist die Periodenlänge eines Linienpaares dementsprechend ca. 4cm.

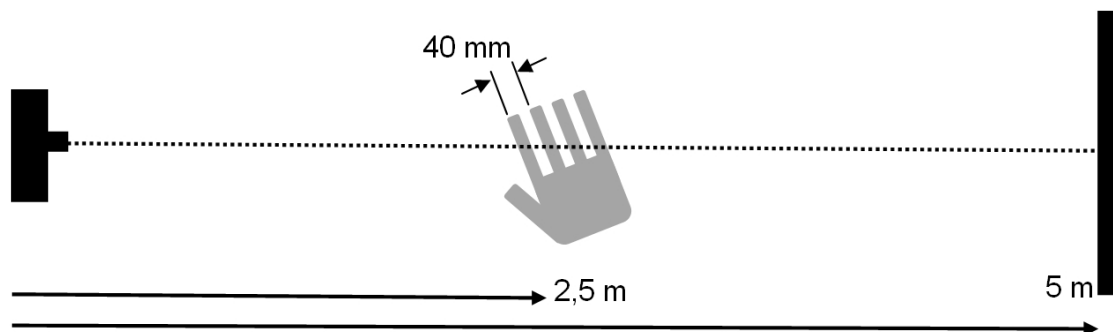


Abbildung 3-23 Praxisbeispiel

Wird die Szene mit dem Skrobol-Objektiv 1:1,1 mit 12,8mm Brennweite aufgenommen, so wird dieses Linienpaar durch den Abbildungsmaßstab auf dem Chip in einer Breite von ca. 0,2mm bzw. ca. 5 Pixeln abgebildet (vergl. Umrechnungstabelle im Anhang, Abbildung 7-1). In der Sensorebene entsprechen also die Finger der Hand einer Ortsfrequenz von 0,2 Linienpaaren pro Pixel.

Betrachtet man die MTF-Kurven des Objektivs für 2,5m Entfernung (Abbildung 3-24), kann man ablesen, dass für die Ortsfrequenz  $0,2 \frac{lp}{px}$  der MTF-Faktor ca. 0,8 beträgt.

Bei der Aufnahme der Szene mit einer Modulationsfrequenz von 20MHz, erstreckt sich der Eindeutigkeitsbereich bis zu einer Entfernung von 7,5m ( $\varphi = 360^\circ$ ). Der Hintergrund in 5m Entfernung entspricht also der Phase  $\varphi = 240^\circ$ , die Hand in 2,5m Entfernung einer Phase von  $\varphi = 120^\circ$ .

Stellt man den durch die Simulation berechneten Phasenfehler dieser Ziel- und Störphasenkombination bei der MTF von 0,8 in Abhängigkeit des Intensitätsverhältnisses dar (Abbildung 3-25), kann der erwartete Fehler vorausgesagt werden. Liegt zum Beispiel ein Intensitätsverhältnis von 2:1 vor, kann ein Phasenfehler von ca.  $12^\circ$  erwartet werden. Im aktuellen Beispiel entsprechen diese  $12^\circ$  einer Distanz von 25cm.

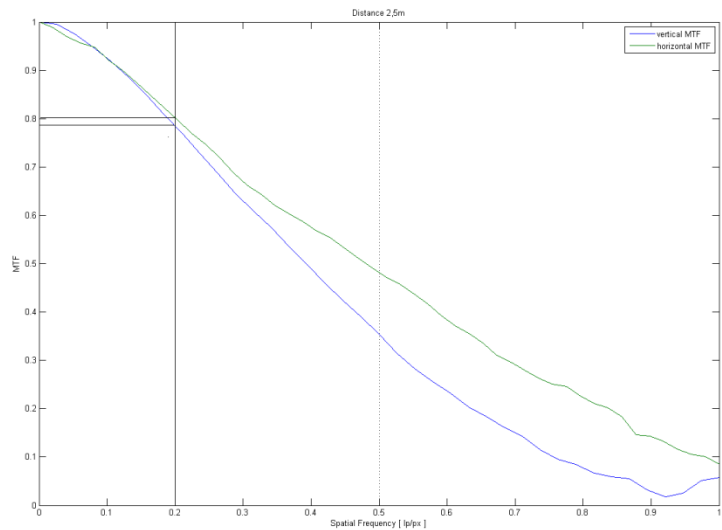


Abbildung 3-24 MTF (Objektiv 1) in 2,5m Entfernung

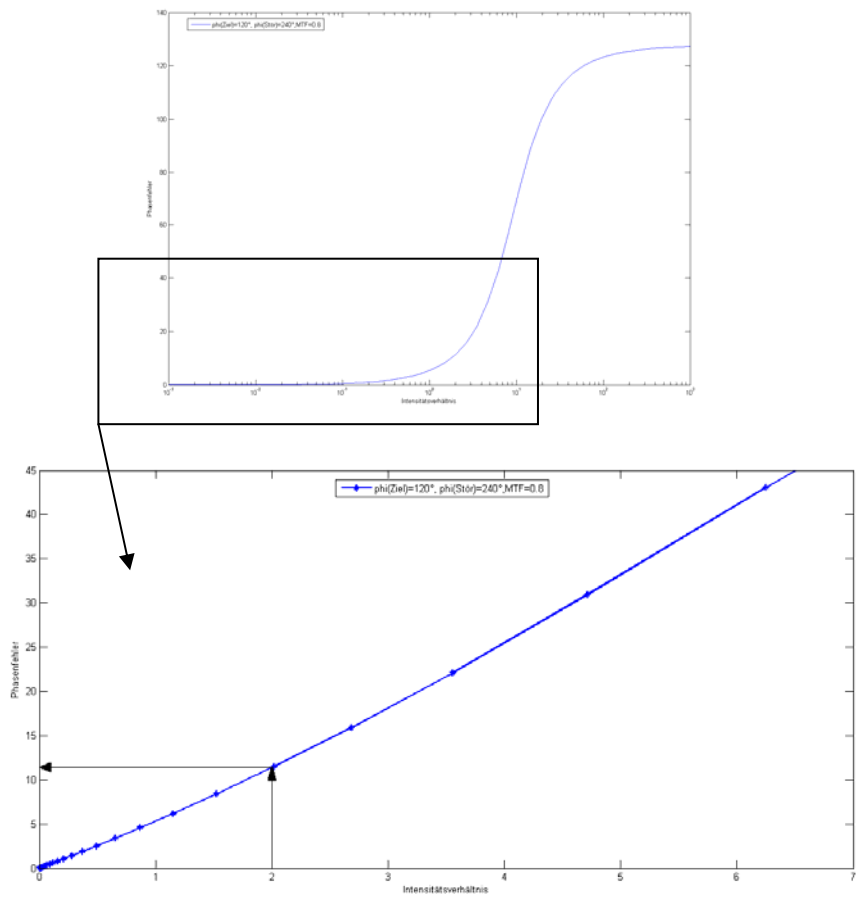


Abbildung 3-25 Ergebnis Phasenfehler Simulation

Um diese Fehler-Voraussage zu prüfen, wird das Beispiel nachgestellt. Anstatt einer echten Hand wird eine Pappe mit 2cm breiten Streifen als Hand-Imitat verwendet. So können zum Bewegungsartefakte und ungleiche Abstände zwischen den Finger vermieden werden. Die Pappe wird wie im obigen Beispiel horizontal, vertikal und schräg in 2,5m Entfernung zur Kamera vor dem 5m entfernten Hintergrund gemessen. Die Werte der Amplituden und Distanzen entsprechen den Mittelwerten aus 100 Frames. Abbildung 3-26 zeigt die Darstellung in CamVis, einer Software von PMDTechnologies. In der 3D-Darstellung links sind gut die „flying pixels“ zwischen Vorder und Hintergrund zu erkennen. Auf der rechten Seite werden das frontale, farbig codierte Distanzbild und das Amplitudenbild angezeigt. Oben links ist die Einstellung von 20MHz zu erkennen.

Abbildung 3-27 bis Abbildung 3-29 zeigen die Auswertungen aus MATLAB, oben jeweils die Amplituden-Daten und unten die Distanzdaten, wobei die rechte Seite jedesmal einen Schnitt durch das Bild an Stelle der roten bzw. weißen Linie darstellt. Da die Amplitudenbilder den Intensitäten entsprechen, ist daraus das Intensitätsverhältnis abzulesen: Es liegen Intensitätsverhältnisse von ca.  $4200/1800 = 2,33$  (Abbildung 3-27) bzw. ca.  $1800/850 = 2,12$  vor. Laut Abbildung 3-25 ergibt sich daraus ein Phasenfehler von ca.  $12^\circ$ - $15^\circ$ , also bei den gegebenen Parametern ein Distanzfehler von ca. 25 bis 31cm.

Betrachtet man nun die Schnitte durch die Distanzbilder sind tatsächlich etliche Fehlpixel in ca. der Größenordnung des vorausberechneten Distanzfehlers zu erkennen (siehe Pfeile). Allerdings treten auch Fehlerpixel in anderer Größenordnung auf, bei denen jedoch vermutlich noch weitere Fehlerquellen eine Rolle spielen. So kann es sich hierbei beispielsweise um Pixel handeln, die aus rein geometrischen Gründen bereits von beiden Distanzen ein Signal bekommen, das heißt Pixel, die auch bei perfekter Übertragung auf der Kante liegen würden. Die Simulation zur Berechnung des Phasenfehlers geht ja lediglich von zwei Pixeln aus, bei denen eine Kante in der Szene bei scharfer Abbildung genau in der Mitte zwischen den Pixeln verlaufen würde. Weiterhin fließen in der Praxis noch weitere Fehler zum Beispiel durch Querreflexe mit ein, die in der Simulation nicht berücksichtigt werden.

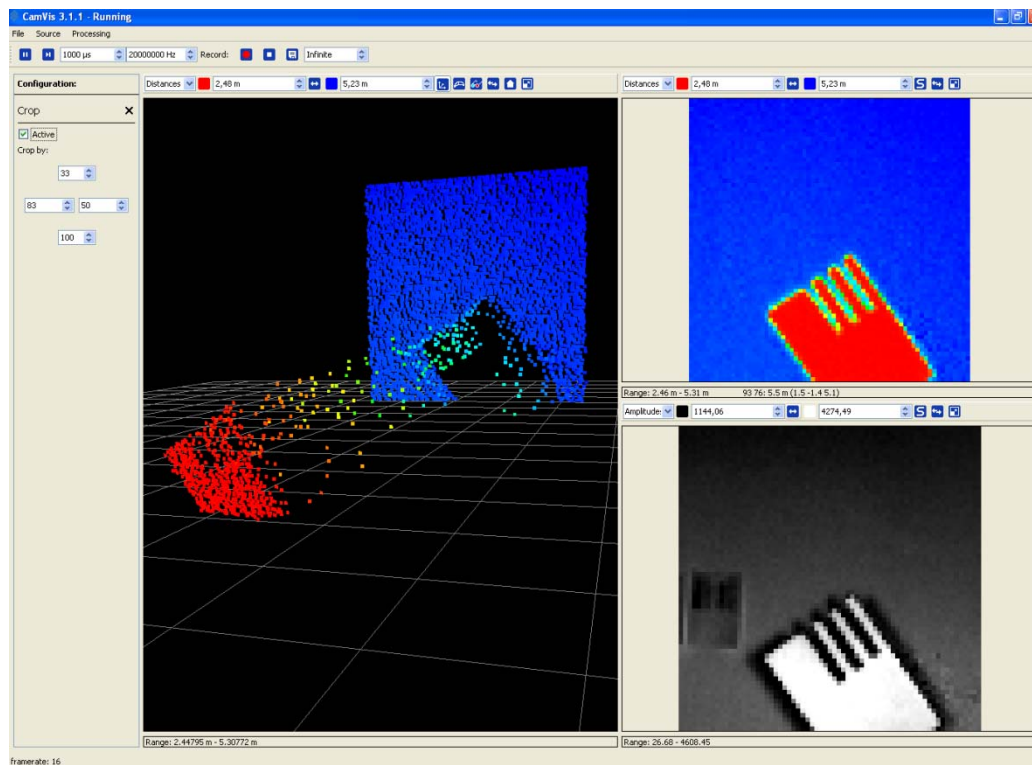


Abbildung 3-26 Screenshot, Darstellung in CamVis3.1.1

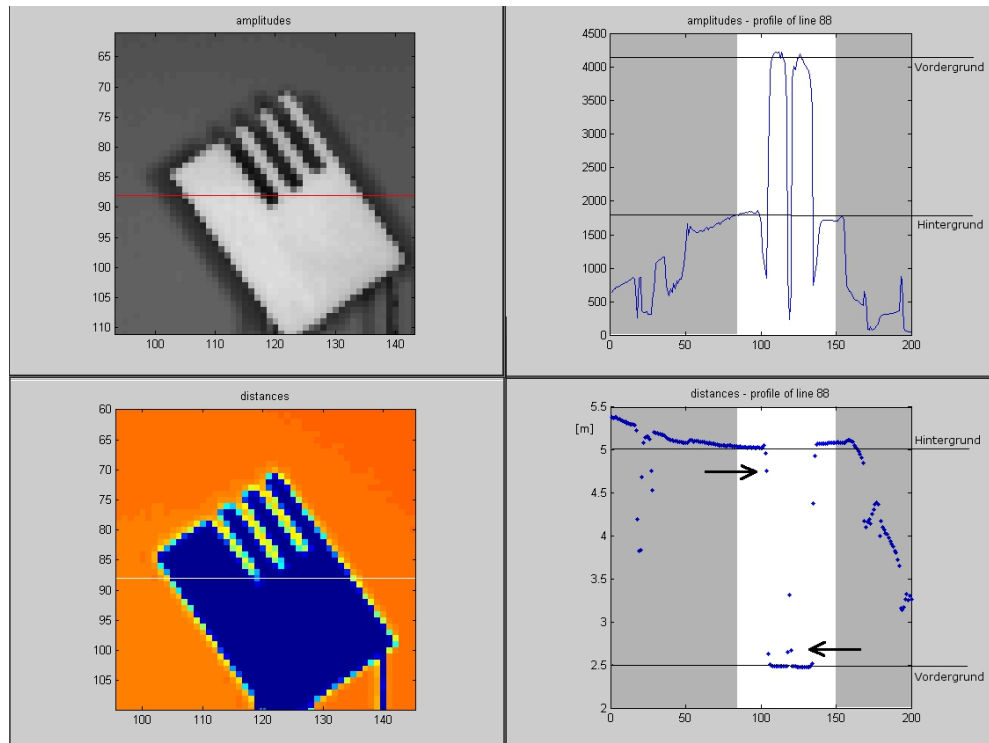


Abbildung 3-27 links: Distanz- und Amplitudenbild, rechts: Schnitt der roten bzw. weißen Linie

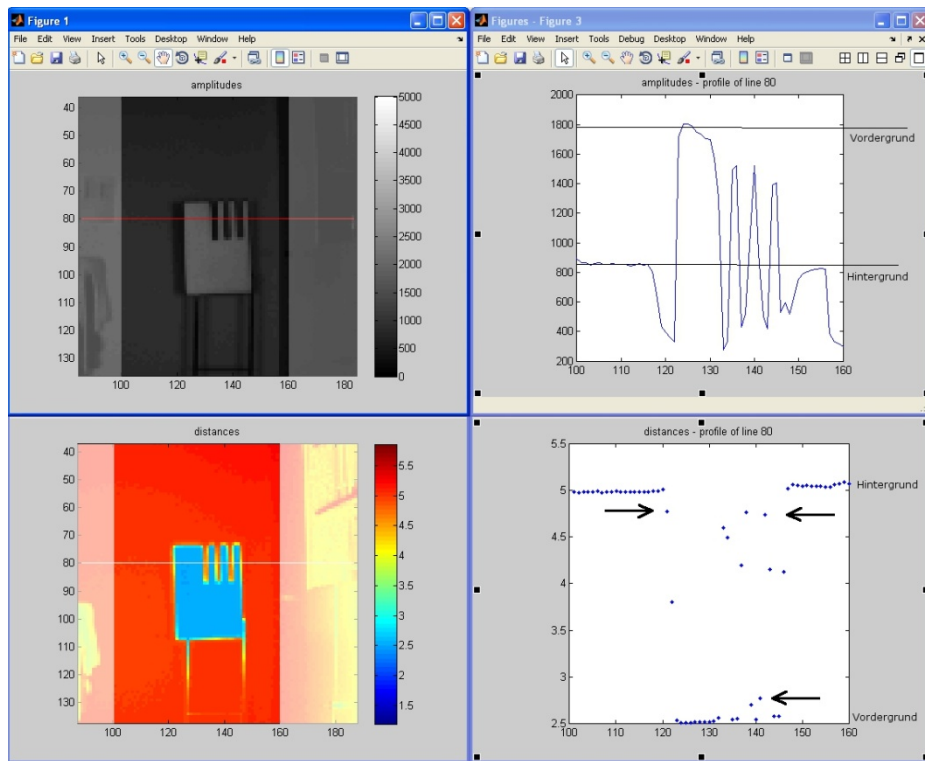


Abbildung 3-28 links: Distanz- und Amplitudenbild, rechts: Schnitt der roten bzw. weißen Linie

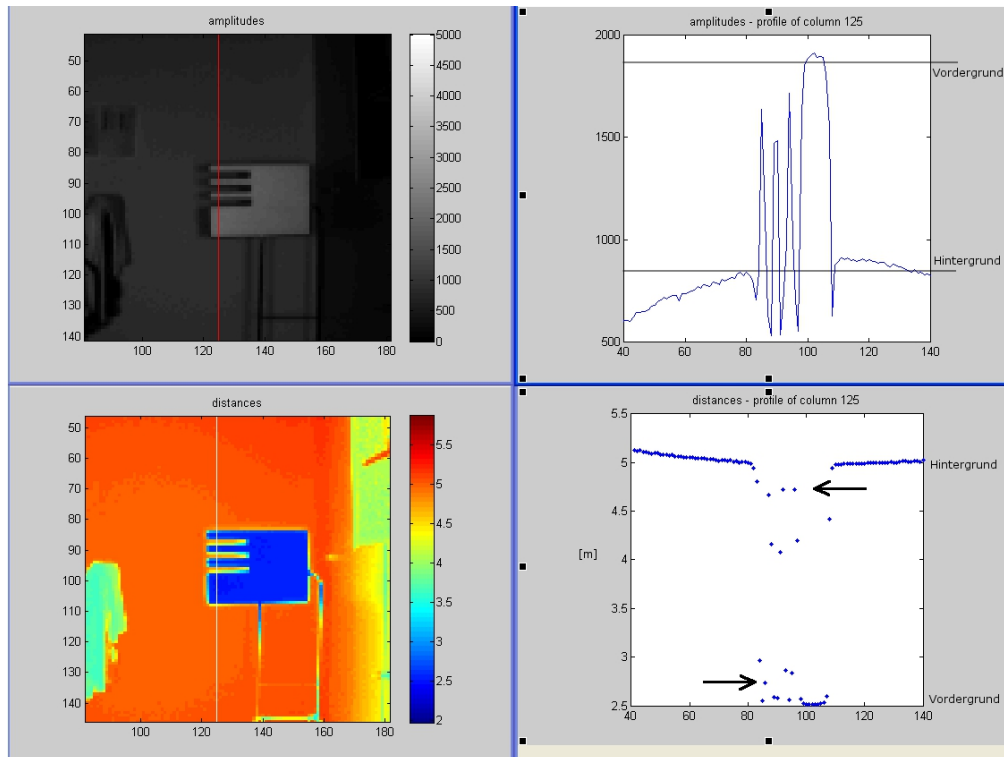


Abbildung 3-29 links: Distanz- und Amplitudenbild, rechts: Schnitt der roten bzw. weißen Linie



## 4 Diskussion

Sollen aus den in dieser Arbeit gemessenen MTF-Werten und der Phasenfehler-Simulation Rückschlüsse auf erforderliche Objektiv-MTF-Werte gezogen werden, so sind diese nur unter Vorbehalt möglich. Wie bereits erwähnt handelt es sich hier um Systemkurven, aus denen die einzelnen Einflüsse verschiedener Faktoren und der einzelnen Komponenten nicht separat extrahiert werden können.

Der Vergleich mit den reinen Objektiv-MTF-Kurven zeigt auch, dass die in der Systemmessung ermittelten Werte nicht ohne weiteres auf die Objektivkurven zu übertragen sind. Allgemein kann jedoch festgehalten werden, dass die Objektiv-MTF höhere Werte aufweisen muss als die System-MTF, da letztere das Produkt aus den MTF der einzelnen Komponenten darstellt. Da die MTF-Werte immer im Bereich zwischen 0 und 1 liegen, können die einzelnen Produkte die Gesamt-MTF nur verkleinern und müssen dementsprechend möglichst hohe Werte aufweisen.

Ebenfalls zu bedenken ist, dass es sich bei der Phasenfehler-Simulation um eine approximative Abschätzung handelt. Unter realen Bedingungen fließen meist noch diverse schwer quantifizierbare Störfaktoren und weitere bekannte Fehler mit ein, die den vorausgesagten simulierten Phasenfehler stark beeinflussen können [2] [3]. Ein großer Faktor sind dabei zum Beispiel Bewegungsartefakte, die schon allein aufgrund der benötigten vier hintereinander aufgenommenen Phasenwerte entstehen können.

Ebenso können Fertigungstoleranzen in der Chiplage von CamCube zu Camcube vermutlich keine allgemeingültigen Aussagen zulassen. Eine leichte Schräglage oder leicht andere Positionierung des Sensors kann eine andere MTF bewirken.

Da sich die MTF-Berechnungen in dieser Arbeit lediglich auf den Bildmittelpunkt beziehen, können die Ergebnisse der Phasenfehler-Simulation auch nur für Strukturen in der Bildmitte angewandt werden, für Randbereiche müssen die hier gewonnenen Erkenntnisse noch validiert werden.

Zu beachten ist, dass sich die MTF auf den sogenannten Mikrokontrast bezieht, also den Kontrast von feinen Strukturen. Der Kontrast zwischen zwei großen Flächen, genannt Makrokontrast wird in den MTF-Messungen nicht betrachtet [6]. Der Makrokontrast wird beeinflusst vom Falschlichtverhalten des Objektivs, welches durch Reflexionen und Lichtstreuungen innerhalb des Objektivs entsteht, die MTF beurteilt jedoch die Korrektur des Objektivs.

Da bei kleineren Intensitätsverhältnissen der berechnete Phasenfehler geringer ist als bei großen Intensitätsverhältnissen, könnte der Eindruck entstehen, dass am Bildrand weniger Probleme auftreten, da dort aufgrund der Vignettierung geringere Intensitäten auftreten. Allerdings ist die Abbildungsqualität z.B. durch Randfehler des Objektivs und Verzerrungen bedingt in der Mitte meist am besten.

## 5 Ausblick

Für eine noch ausführlichere Analyse und einen umfassenderen Vergleich der Objektive sollten weitere MTF-Messungen in den Randbereichen und Ecken des Bildes durchgeführt werden.

Ebenso sollten weitere Einflüsse auf die Ermittlung der MTF geprüft werden, zum Beispiel unterschiedliche Integrationszeiten.

Als Weiterführung dieser Arbeit kann getestet werden, ob die vorausgesagten Phasenfehler der Simulation durch Bildverarbeitung eliminiert werden können oder bereits im Vorfeld durch eine Filterung, beispielsweise Kantenschärfung korrigierbar bzw. zu verringern sind.

## 6 Zusammenfassung

Durch die Berechnung der bildseitigen Schärfentiefe und den Toleranzbereich für die Sensorlage in Kapitel 3.3 wird klar, dass die Scharfeinstellung eine hohe Prä-

zision erfordert. Diese ist leichter zu erreichen, indem ein Objektiv mit Einstellring verwendet wird, an dem die Schärfeebene nach Festschrauben des Objektivs eingestellt werden kann.

Der Vergleich der MTF-Kurven verschiedener Objektive in Kapitel 3.4 zeigt, dass sich für Anwendungen im Nahbereich von 1m bis ca. 1,7m das Kowa-Objektiv besser eignet und für alle anderen Anwendungen auf die Skrobol-Objektive zurückgegriffen werden kann.

Die Objektiv-MTF-Kurven des Herstellers können qualitativ zur Bewertung der Eignung eines Objektivs verwendet werden. Es finden sich Ähnlichkeiten in den Kurvenverläufen zwischen optischer und gemessener System-MTF, ebenso im Verhältnis zwischen unterschiedlichen Objektiven. Eine quantitative Bewertung der Herstellerkurven ist jedoch nicht möglich, da Eigenschaften des Systems wie die Pixelapertur und auch die Objektweite einen großen Einfluss auf die Modulationsübertragung haben. Es sollte allgemein bei der Objektivauswahl auf möglichst flache MTF-Kurven auf hohem Niveau geachtet werden, da dies eine hohe Kantenschärfe bedeutet.

Die Phasenfehler-Simulation (Kapitel 3.6) zeigt, dass der durch eine nicht perfekte Modulationsübertragung entstehende Fehler gravierend sein kann und stark vom Intensitätsverhältnis der Szene abhängt. Durch die Simulation kann bei bekannter MTF des Systems in Zukunft eine approximative Voraussage für die Größe dieses Fehlers getroffen werden.

## 7 Anhang

### 7.1 Umrechnung Linienpaare Bildebene / Szene

| Pixelebene     |                  |        |        | entspricht in der Szene [mm / lp] |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------------|------------------|--------|--------|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Frequenz       | Länge Linienpaar |        |        |                                   |         |         |         |         |         |         |         |         |
| lp/ px         | lp/ mm           | px/ lp | mm/ lp | in Entfernung a [m]               | 1       | 1,5     | 2       | 2,5     | 3       | 3,5     | 4       | 4,5     |
| 0,086          | 1,91             | 11,6   | 0,52   |                                   | 40,36   |         |         |         |         |         |         |         |
| 0,1            | 2,22             | 10,0   | 0,45   |                                   | 34,71   | 52,28   | 69,86   | 87,44   | 105,02  | 122,60  | 140,18  | 157,75  |
| 0,2            | 4,44             | 5,0    | 0,23   |                                   | 17,35   | 26,14   | 34,93   | 43,72   | 52,51   | 61,30   | 70,09   | 78,88   |
| 0,25           | 5,56             | 4,0    | 0,18   |                                   | 13,88   | 20,91   | 27,95   | 34,98   | 42,01   | 49,04   | 56,07   | 63,10   |
| 0,3            | 6,67             | 3,3    | 0,15   |                                   | 11,57   | 17,43   | 23,29   | 29,15   | 35,01   | 40,87   | 46,73   | 52,58   |
| 0,4            | 8,89             | 2,5    | 0,11   |                                   | 8,68    | 13,07   | 17,47   | 21,86   | 26,25   | 30,65   | 35,04   | 39,44   |
| 0,5            | 11,11            | 2,0    | 0,09   |                                   | 6,94    | 10,46   | 13,97   | 17,49   | 21,00   | 24,52   | 28,04   | 31,55   |
| 0,45           | 10,00            | 2,2    | 0,10   |                                   | 7,71    | 11,62   | 15,53   | 19,43   | 23,34   | 27,24   | 31,15   | 35,06   |
| 0,225          | 5                |        |        |                                   |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Abmaßstab      |                  |        |        |                                   | -0,0130 | -0,0086 | -0,0064 | -0,0051 | -0,0043 | -0,0037 | -0,0032 | -0,0029 |
| bei Brennweite |                  |        |        |                                   | 0,0128  |         |         |         |         |         |         |         |

$$[lp/mm] = [lp/px] / (45 \cdot 10^{-3})$$

Abbildung 7-1 Umrechnungstabelle Linienpaare Bildebene / Szene

### 7.2 Kurven vertikale MTF

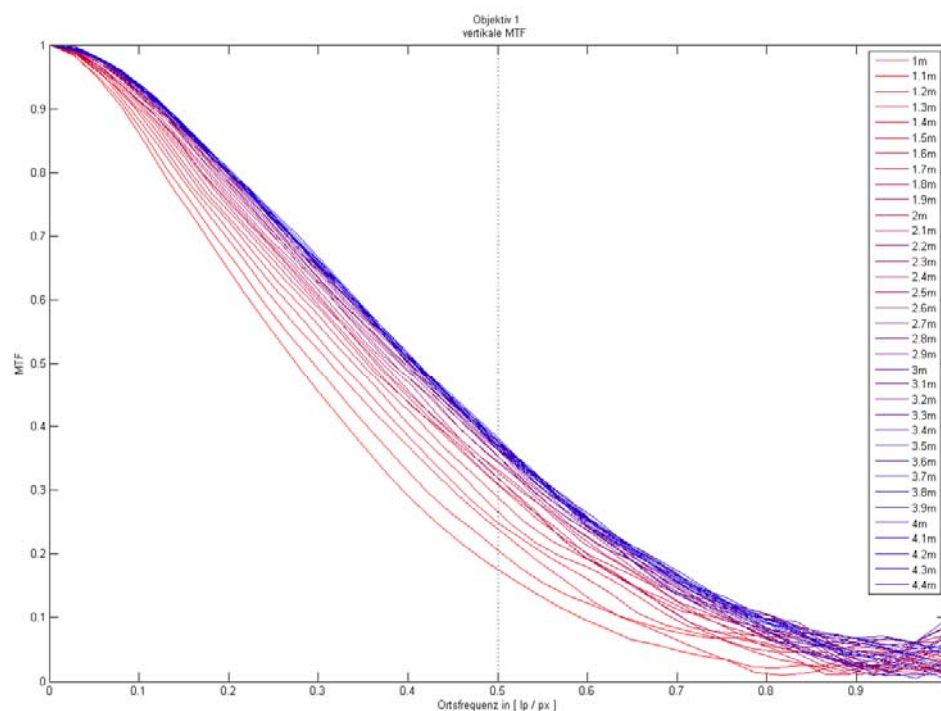


Abbildung 7-2 Objektiv 1, vertikale MTF, alle Entfernungen

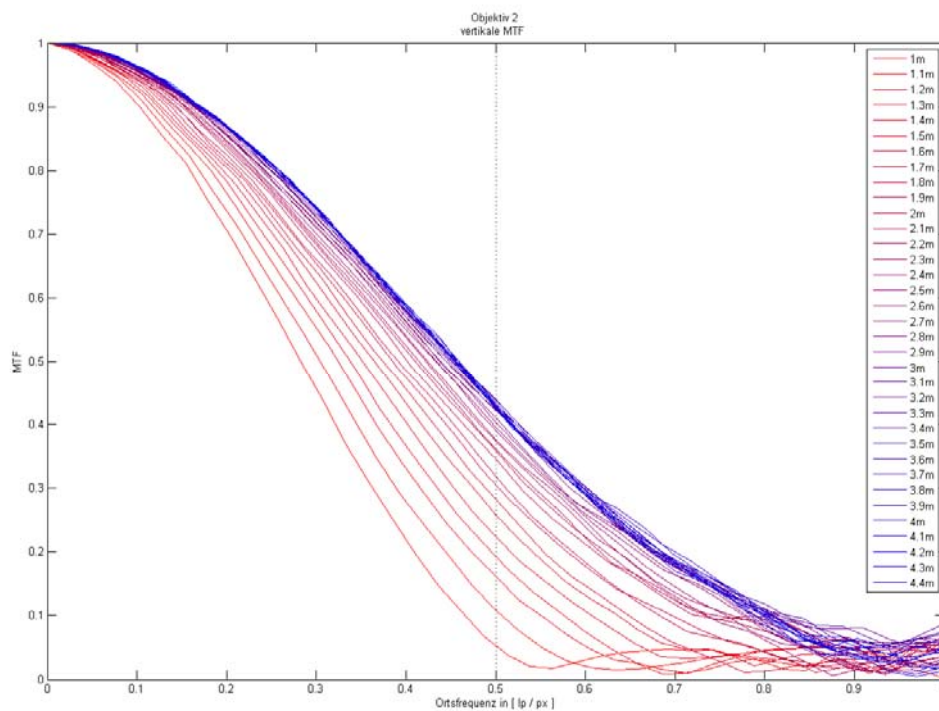


Abbildung 7-3 Objektiv 2, vertikale MTF, alle Entfernungen

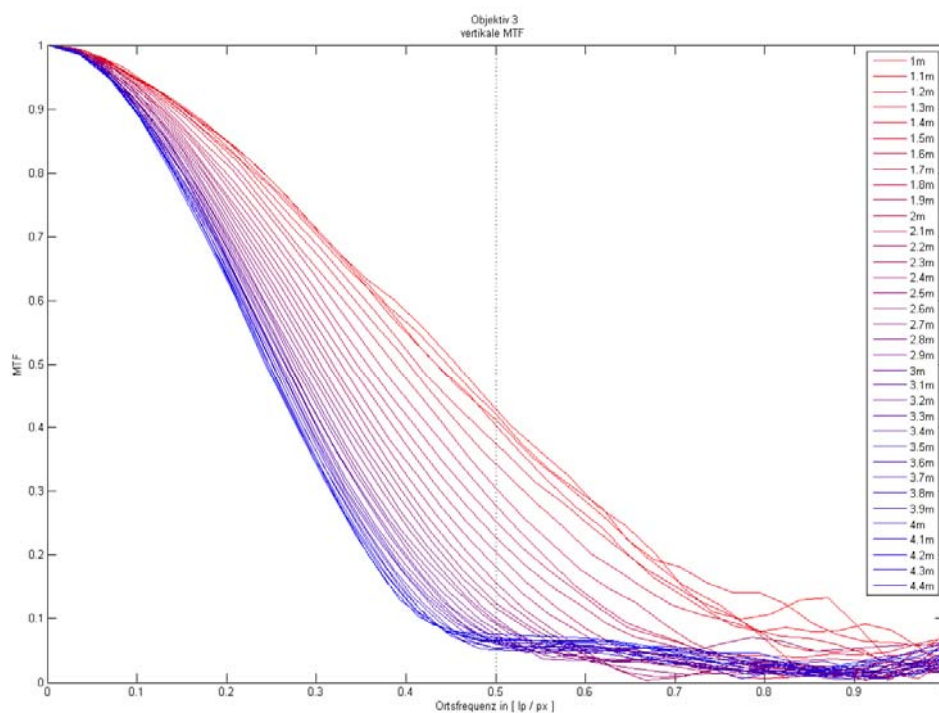


Abbildung 7-4 Objektiv 3, vertikale MTF, alle Entfernungen

### 7.3 Literaturverzeichnis

- [1] Tobias Möller, Holger Kraft, Jochen Frey, Martin Albrecht, Robert Lange, "Robust 3D Measurement with PMD Sensors," PMD Technologies, Siegen, Proceedings of the 1st Range Imaging Research Day at ETH Zurich 2005.
- [2] Marvin Lindner, Andreas Kolb, "Calibration of the Intensity-Related Distance error of the PMD TOF-Camera," Institute for Vision and Graphics, University of Siegen, Germany, Paper 2007.
- [3] Helena Barke, "Untersuchung und Kompensierung von systematischen Fehlern in einer PMD[vision]19k-Kamera," Institut für Medien- und Phototechnik, FH Köln / PMDTechnologies, Köln / Siegen, Diplomarbeit 2008.
- [4] H. Naumann, G. Schröder, *Bauelemente der Optik: Taschenbuch der technischen Optik*, 6th ed. München: Carl Hanser Verlag, 1992.
- [5] DIN, "DIN 1335, Geometrische Optik - Bezeichnungen und Definitionen," Normenausschuss Feinmechanik und Optik (NAFuO), DIN-Norm 1983.
- [6] H. H. Nasse, "Wie liest man MTF-Kurven?," Carl Zeiss, 2008.
- [7] Gottfried Schröder, *Technische Optik*, 8th ed.: Vogel Verlag und Druck, 1998.
- [8] PMDTechnologies, "PMD[vision] CamCube 3.0," Siegen, Datasheet V. No. 20100601,.
- [9] Thomas Thöniß, "Objektive in der industriellen Bildverarbeitung," , 2006.
- [10] Prof. C. Blendl, "Praktikumsanleitung Messtechnik, Bestimmung der Modulationsübertragungsfunktion einer Digitalkamera," FH Köln, Institut für Medien- und Phototechnik, 2010.

- [11] Peter Burns, "Slanted-Edge MTF for Digital Camera and Scanner Analysis," Eastman Kodak Company, Rochester, NY USA, Proceeding IS&T 2000 PICS Conference 2000.
- [12] ISO, "ISO 12233, Photography - Electronic still-picture cameras - Resolution Measurement," 2000.
- [13] Katja Köhler, "Verfahren zur Bestimmung der Modulationsübertragungsfunktion (MTF) digitaler Kamerasysteme," FH Köln, Institut für Medien- und Phototechnik, Diplomarbeit 2007.
- [14] Peter Burns, "sfrmat 2.0 User's Guide," <http://www.i3a.org/resources/#iso>, 2003.
- [15] H. H. Nasse, "Wie liest man MTF-Kurven? Teil II," Carl Zeiss, 2009.

## 7.4 Abbildungsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 1-1 PMD[vision]®CamCube3.0 (Foto: M. Kramer) .....  | 2  |
| Abbildung 2-1 Time-of-Flight - Prinzip, entnommen aus [1] .....   | 3  |
| Abbildung 2-2 PMD Time-of-Flight, entnommen aus [1] .....   | 4  |
| Abbildung 2-3 PMD-Pixel Querschnitt, entnommen aus [1] .....  | 6  |
| Abbildung 2-4 Ladungsverteilung bei unterschiedlicher Zieldistanz, entnommen aus [1] .....                | 6  |
| Abbildung 2-5 Korrelationsfunktion berechnet aus 4 Stützstellen .....                                     | 8  |
| Abbildung 2-6 Systematischer Fehler .....   | 10 |
| Abbildung 2-7 Optische Abbildung, Vorzeichenkonvention nach DIN 1335 [5] ..                               | 12 |
| Abbildung 2-8 Modulation Original / Abbildung .....   | 14 |
| Abbildung 3-1 Pixelstruktur PMD-Sensor (Ausschnitt) .....   | 17 |
| Abbildung 3-2 Schärfentiefe abhängig von der Einstellentfernung .....                                     | 20 |
| Abbildung 3-3 Unschärfekreisdurchmesser bei $a=1,35\text{m}$ (links) und bei $a=2\text{m}$ (rechts) ..... | 21 |
| Abbildung 3-4 Toleranzbereich für axiale Lageunsicherheit des Sensors .....                               | 22 |
| Abbildung 3-5 Messaufbau Slanted-Edge .....   | 25 |
| Abbildung 3-6 Linearitätstest .....   | 26 |
| Abbildung 3-7 Amplitudenbild ohne (links) und mit Shading-Korrektur (rechts) ..                           | 27 |
| Abbildung 3-8 Programmablauf Slanted-Edge Test .....  | 29 |
| Abbildung 3-9 Objektiv 1, horizontale MTF, alle Entfernungen .....  | 30 |
| Abbildung 3-10 Objektiv 2, horizontale MTF, alle Entfernungen .....                                       | 31 |
| Abbildung 3-11 Objektiv 3, horizontale MTF, alle Entfernungen .....                                       | 31 |
| Abbildung 3-12 Fläche MTF bis Nyquistfrequenz .....   | 32 |
| Abbildung 3-13 Horizontale MTF, inkl. Objektiv3 - Scharfstellung auf 4m .....                             | 34 |
| Abbildung 3-14 Vergleich Objektiv-MTF mit System-MTF .....  | 36 |
| Abbildung 3-15 Idee der Phasenfehler Simulation .....   | 38 |
| Abbildung 3-16 Ablauf Phasenfehler Simulation .....   | 39 |
| Abbildung 3-17 Phasenfehler-Simulation, gleiche Phase Ziel und Störer .....                               | 40 |
| Abbildung 3-18 Phasenfehler-Simulation, $\text{MTF}=1$ .....  | 40 |
| Abbildung 3-19 Phasenfehler-Simulation, maximaler Fehler .....  | 41 |
| Abbildung 3-20 Phasenfehler-Simulation, maximaler Fehler .....  | 42 |
| Abbildung 3-21 Maximaler Fehler ( $\text{MTF}=0.8$ , Intensitätsverhältnis 10:1) .....                    | 43 |



|   |    |
|---|----|
| Abbildung 3-22 Maximaler Fehler ( $MTF=0.99$ , Intensitätsverhältnis 100:1) .....                   | 43 |
| Abbildung 3-23 Praxisbeispiel.....  | 44 |
| Abbildung 3-25 Ergebnis Phasenfehler Simulation .....   | 46 |
| Abbildung 3-24 MTF (Objektiv 1) in 2,5m Entfernung .....  | 46 |
| Abbildung 3-26 Screenshot, Darstellung in CamVis3.1.1 .....   | 48 |
| Abbildung 3-27 links: Distanz- und Amplitudenbild, rechts: Schnitt der roten bzw. weißen Linie..... | 48 |
| Abbildung 3-28 links: Distanz- und Amplitudenbild, rechts: Schnitt der roten bzw. weißen Linie..... | 49 |
| Abbildung 3-29 links: Distanz- und Amplitudenbild, rechts: Schnitt der roten bzw. weißen Linie..... | 49 |
| Abbildung 7-1 Umrechnungstabelle Linienpaare Bildebene / Szene .....                                | 53 |
| Abbildung 7-2 Objektiv 1, vertikale MTF, alle Entfernungen .....                                    | 53 |
| Abbildung 7-3 Objektiv 2, vertikale MTF, alle Entfernungen .....                                    | 54 |
| Abbildung 7-4 Objektiv 3, vertikale MTF, alle Entfernungen .....                                    | 54 |

## 7.5 Weiterer Anhang

CD mit MATLAB Dateien und PDF der Bachelorarbeit.

## **7.6 Eidesstattliche Erklärung**

Ich versichere hiermit, die vorgelegte Arbeit in dem gemeldeten Zeitraum ohne fremde Hilfe verfasst und mich keiner anderen als der angegebenen Hilfsmittel und Quellen bedient zu haben.

Köln, den 21. Februar 2011

## **7.7 Sperrvermerk**

Die vorgelegte Arbeit unterliegt keinem Sperrvermerk.

## **7.8 Weitergabeerklärung**

Ich erkläre hiermit mein Einverständnis, dass das vorliegende Exemplar meiner Bachelorarbeit oder eine Kopie hiervon für wissenschaftliche Zwecke verwendet werden darf.

Köln, den 21. Februar 2011